



Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Aeroespacial

Projeto e Construção de Queimador Atmosférico com Controle de Temperatura de Chama para Cutelaria

Autor: Luís Fernando Marzola da Cunha
Orientador: Prof. Dr. Rhander Viana

Brasília, DF
2019



Luís Fernando Marzola da Cunha

Projeto e Construção de Queimador Atmosférico com Controle de Temperatura de Chama para Cutelaria

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Aeroespacial) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Aeroespacial).

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Dr. Rhander Viana

Coorientador: Prof. Dr. Domenico Simone

Brasília, DF

2019

Luís Fernando Marzola da Cunha

Projeto e Construção de Queimador Atmosférico com Controle de Temperatura de Chama para Cutelaria/ Luís Fernando Marzola da Cunha. – Brasília, DF, 2019-
174 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Rhander Viana

Coorientador: Prof. Dr. Domenico Simone

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2019.

1. Queimador Atmosférico . 2. Cutelaria. I. Prof. Dr. Rhander Viana. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Projeto e Construção de Queimador Atmosférico com Controle de Temperatura de Chama para Cutelaria

CDU 02:141:005.6

Luís Fernando Marzola da Cunha

Projeto e Construção de Queimador Atmosférico com Controle de Temperatura de Chama para Cutelaria

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Aeroespacial) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Aeroespacial).

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 01 de junho de 2019:

Prof. Dr. Rhander Viana
Orientador

Prof. Dr. Domenico Simone
Coorientador

Prof. Me. Danilo dos Santos Oliveira
Convidado 1

Brasília, DF
2019

Agradecimentos

Primeiramente eu gostaria de agradecer à minha família e amigos, em especial à minha mãe Vanessa de Fátima Rocha Marzola que me deu todo e qualquer suporte necessário para ingressar na universidade e concluir essa graduação. Sem seu incondicional carinho e incentivo, e sem sua fé na educação como ferramenta absolutamente decisiva para transformação e desenvolvimento do ser humano e sociedade, definitivamente eu não conseguiria chegar ao fim dessa árdua conquista.

Gostaria de deixar meus sinceros agradecimentos ao meu orientador Rhander Viana pelo apoio a todas as atividades que o propus, assim como por sua conduta como professor que busca apoiar e ajudar da melhor maneira possível todos aqueles que lhe procuram. Também gostaria de agradecer, em nome de toda a FGA, pelos seus cuidados e gestão das instalações do galpão junto ao Danilo Oliveira, José Henrique e Matheus Almeida, pois grande parte dos projetos são resultado do apropriado funcionamento das áreas de usinagem e solda.

Também gostaria de agradecer meu coorientador Domenico Simone, por sua voluntária preocupação em relação ao desenvolvimento dos alunos e curso de Engenharia Aeroespacial, assim como pelo apoio dado a conclusão do meu TCC. Sem seus esforços; a evolução do curso, bem como a prospecção de novas parcerias internacionais seriam definitivamente mais lentas.

Agradeço também ao corpo docente e servidores da Universidade de Brasília - FGA. Àqueles que acreditam, assim como eu, no imenso potencial transformador desse campus para o desenvolvimento da tecnologia no cenário nacional e mundial. Além de agradecer, desejo-lhes força e resiliência para criar e melhorar continuamente ao longo dos anos um centro formador de engenheiros de referência mundial. Meus particulares reconhecimentos aos serviços prestados ao campus pela Prof. Paula Meyer e servidores Waldemir e Miriam.

Tenho também o prazer de poder agradecer, em nome de todos os brasileiros, àqueles que vieram de outros países para ajudar a desenvolver a educação no Brasil, compondo o corpo docente do curso de Engenharia Aeroespacial. Independentemente dos interesses particulares de cada um, sabemos que deixaram parte de suas famílias e corações em suas terras para aqui estar. Nossos sinceros agradecimentos.

À equipe FGR e todos aqueles que estiveram e estão trabalhando para o seu desenvolvimento, meus sinceros agradecimentos. Devido ao grande aprendizado que obtive e grandes amigos que fiz ao longo de minha participação na equipe, pude me manter motivado a continuar na faculdade. Participar da equipe também me motivou cada vez mais a me tornar engenheiro, ao poder observar o quão desafiador e mágico é o mundo do desenvolvimento de projetos de engenharia.

*“A determinação de hoje é o sucesso de amanhã”
(Museu do Amanhã, 2017)*

Resumo

A concepção e projeto de um queimador atmosférico para forno de forja aplicado a cutelaria é o objetivo final deste trabalho, a ênfase do trabalho é referente ao queimador atmosférico com ajuste de temperatura regulável em função da entrada de ar atmosférico.

O método de solução para o problema consiste na delimitação da temperatura de operação para o processo de forjamento em cutelaria. A partir deste parâmetro associado ao limite estipulado para a dimensão das peças, as quais serão produzidas para um forno estimado, se torna possível desenhar a solução do sistema.

O projeto consiste no dimensionamento e construção de um queimador atmosférico capaz de controlar a temperatura adiabática de chama a partir do controle da entrada de ar, o controle da quantidade de calor se deve ao controle da pressão de entrada do gás combustível.

A metodologia empregada permitiu o projeto de um queimador com capacidade de controlar a temperatura de chama por meio da regulação mecânica da área de abertura da entrada do ar atmosférico, assim como o emprego do bocal dimensionado potencializou as temperaturas limites do queimador.

Os resultados mostraram que enquanto um queimador atmosférico comercializado atualmente tem potencial médio de atingir cerca de 850°C somente com parâmetros de coloração de chama para identificação da temperatura alcançada, e sem graduação para o controle da temperatura de chama; o queimador projetado segundo a metodologia empregada ao longo deste trabalho, possibilitou atingir limites de chama com controlabilidade média de até cerca de 1050°C, além de possuir parâmetros bem definidos de controlabilidade de temperatura de chama assim como as suas respectivas faixas.

A solução prevê estudos posteriores ao trabalho, relacionados à geometria da câmara de combustão, ângulo de entrada da chama e influência da posição do orifício de saída do gás combustível, e por tal motivo propõe desenho que permita esse tipo de estudo posterior.

Palavras-chaves: Queimador. Atmosférico. Forno. Forja. Forjamento. Cutelaria. GLP. Temperatura. Controlada. Adiabática. de. Chama

Abstract

The conception and design of an atmospheric burner for forging furnace applied to cutlery is the final objective of this work, the emphasis of work is on the controlled atmospheric burner with adjustable temperature as a function of atmospheric air intake.

The solution method for the problem consists of the delimitation of the operating temperature for the forging process in cutlery. From this parameter associated with the limit stipulated for the dimension of the pieces, which will be produced for an estimated furnace, it becomes possible to draw the solution of the system.

The project consists of the design and construction of an atmospheric burner capable of controlling the adiabatic flame temperature from the control of the air intake, the control of the amount of heat is due to the control of the fuel gas inlet pressure.

The methodology used allowed the design of a burner with the capacity to control the flame temperature by means of the mechanical regulation of the opening area of the atmospheric air intake, as well as the use of the designed nozzle, which increased the burner limits. The results showed that while a commercially available atmospheric burner has a mean potential to reach about 850 °C only with flame coloration parameters to identify the temperature reached, and no degree to control the flame temperature; the burner designed according to the methodology used throughout this work, allowed to reach flame limits with medium controllability of up to about 1050 °C, besides having well defined flame temperature controllability parameters as well as their respective ranges.

The solution provides for post-work studies, related to the geometry of the combustion chamber, the angle of entry of the flame and the influence of the position of the exit orifice of the fuel gas, and for this reason it proposes a design that allows this type of later study.

Key-words: Burner. Atmospheric. Furnace. Forge. Forging. Cutlery. LPG. Temperature. Controlled. Adiabatic. Flame.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Forjamento Livre e em Matriz - Ilustrado (BRESCIANI, 1991)	28
Figura 2 – Esquemático Forjamento Livre (FERREIRA, 2010)	28
Figura 3 – Princípio Funcionamento Queimador Atmosférico ¹ - Adaptado	31
Figura 4 – Bicos injetores - Fonte: (BERRY I. V. BRUMBAUGH, September, 1921)	32
Figura 5 – Dutos - Estágio Mistura - Fonte: (BERRY I. V. BRUMBAUGH, September, 1921)	33
Figura 6 – Escoamento Quasi-Unidimensional (ANDERSON, 2011)	35
Figura 7 – Escoamento Incompressível em duto convergente e divergente respectivamente (ANDERSON, 2011)	36
Figura 8 – Relações Área e Pressão (ANDERSON, 2011)	37
Figura 9 – Regulador de Pressão ¹	38
Figura 10 – Regulador de Pressão Harris	39
Figura 11 – Composição Hidrocarbonetos - GLP ²	40
Figura 12 – Diagrama Generalizado de Compressibilidade de Nelson-Obert - (CENGEL, 2015b)	44
Figura 13 – Camara de Combustão - Qin - Qout	49
Figura 14 – Resistência Térmica através de Parede Multicamadas (CENGEL, 2015a)	49
Figura 15 – Esquemático - Queimador Atmosférico	52
Figura 16 – Pressão Operação x Pressão Reduzida	54
Figura 17 – Temperaturas Adiabáticas de Chama - Hidrocarbonetos	56
Figura 18 – Temperatura Adiabáticas de Chama	56
Figura 19 – Tempo de Consumo e Fluxo Mássico em função da Pressão de Operação Orifício = 0,8mm , Bocal = 0,3 , Abertura = 9mm	57
Figura 20 – Tempo de Consumo e Fluxo Mássico em função da Pressão de Operação Orifício = 0,8mm , Bocal = 0,3 , Abertura = 9mm	58
Figura 21 – Tempo de Consumo e Fluxo Mássico em função da Pressão de Operação Modelo 11 - Orifício = 0,8mm , Bocal = 0,3 , Abertura = 3mm	60
Figura 22 – Tempo de Consumo e Fluxo Mássico em função da Pressão de Operação Modelo 13 - Orifício = 0,8mm , Bocal = 0,3 , Abertura = 9mm	61
Figura 23 – Tempo de Consumo e Fluxo Mássico em função da Pressão de Operação Modelo 15 - Orifício = 0,8mm , Bocal = 0,3 , Abertura = 15mm	61
Figura 24 – Tempo de Consumo e Fluxo Mássico em função da Pressão de Operação Modelo 17 - Orifício = 0,8mm , Bocal = 0,3 , Abertura = 60mm	62
Figura 25 – Tempo de Consumo e Fluxo Mássico em função da Pressão de Operação Modelo 18 - Orifício = 0,8mm , Bocal = 0,3 , Abertura = 90mm	62

Figura 26 – Tempo de Consumo e Fluxo Mássico em função da Pressão de Operação Modelo 21 - Orifício = 0,8mm , Bocal = 0,1 , Abertura = 9mm	64
Figura 27 – Tempo de Consumo e Fluxo Mássico em função da Pressão de Operação Modelo 23 - Orifício = 0,8mm , Bocal = 0,2 , Abertura = 9mm	64
Figura 28 – Tempo de Consumo e Fluxo Mássico em função da Pressão de Operação Modelo 25 - Orifício = 0,8mm , Bocal = 0,3 , Abertura = 9mm	65
Figura 29 – Tempo de Consumo e Fluxo Mássico em função da Pressão de Operação Modelo 27 - Orifício = 0,8mm , Bocal = 0,8 , Abertura = 9mm	65
Figura 30 – Tempo de Consumo e Fluxo Mássico em função da Pressão de Operação Modelo 28 - Orifício = 0,8mm , Bocal = 0,99 , Abertura = 9mm	66
Figura 31 – Estimativa Preliminar Taxa de Calor Materiais	67
Figura 32 – Esboço Preliminar Forno	68
Figura 33 – Rosca Métrica ⁶	69
Figura 34 – Rosca Witworth ⁶	69
Figura 35 – Controlabilidade Razão Equivalente e Temperatura x Abertura	72
Figura 36 – Controlabilidade Temperatura Adiabática de Chama x Abertura	73
Figura 37 – Quantidade de Calor	73
Figura 38 – Autonomia e Fluxo Mássico Primário	74
Figura 39 – Estimativas de Custo do Queimador	75
Figura 40 – Modelo 11 (tabela 6) - Controle Temperatura - Abertura e Razões Equivalentes	97
Figura 41 – Modelo 11 (tabela 6) - Quantidade de Calor	98
Figura 42 – Modelo 11 (tabela 6) - Temperatura Adiabática - Limites e Controla- bilidade	98
Figura 43 – Modelo 12 (Tabela 6) - Controle Temperatura - Abertura e Razões Equivalentes	99
Figura 44 – Modelo 12 (Tabela 6) - Quantidade de Calor	100
Figura 45 – Modelo 12 (tabela 6) - Temperatura Adiabática - Limites e Controla- bilidade	100
Figura 46 – Modelo 13 (Tabela 6) - Controle Temperatura - Abertura e Razões Equivalentes	101
Figura 47 – Modelo 13 (Tabela 6) - Quantidade de Calor	102
Figura 48 – Modelo 13 (tabela 6) - Temperatura Adiabática - Limites e Controla- bilidade	102
Figura 49 – Modelo 14 (Tabela 6) - Controle Temperatura - Abertura e Razões Equivalentes	103
Figura 50 – Modelo 14 (Tabela 6) - Quantidade de Calor	104
Figura 51 – Modelo 14 (tabela 6) - Temperatura Adiabática - Limites e Controla- bilidade	104

Figura 52 – Modelo 15 (Tabela 6) - Controle Temperatura - Abertura e Razões Equivalentes	105
Figura 53 – Modelo 15 (Tabela 6) - Quantidade de Calor	106
Figura 54 – Modelo 15 (tabela 6) - Temperatura Adiabática - Limites e Controla- bilidade	106
Figura 55 – Modelo 16 (Tabela 6) - Controle Temperatura - Abertura e Razões Equivalentes	107
Figura 56 – Modelo 16 (Tabela 6) - Quantidade de Calor	108
Figura 57 – Modelo 16 (tabela 6) - Temperatura Adiabática - Limites e Controla- bilidade	108
Figura 58 – Modelo 17 (Tabela 6) - Controle Temperatura - Abertura e Razões Equivalentes	109
Figura 59 – Modelo 17 (Tabela 6) - Quantidade de Calor	110
Figura 60 – Modelo 17 (tabela 6) - Temperatura Adiabática - Limites e Controla- bilidade	110
Figura 61 – Modelo 18 (Tabela 6) - Controle Temperatura - Abertura e Razões Equivalentes	111
Figura 62 – Modelo 18 (Tabela 6) - Quantidade de Calor	112
Figura 63 – Modelo 18 (tabela 6) - Temperatura Adiabática - Limites e Controla- bilidade	112
Figura 64 – Modelo 21 (tabela 6) - Controle Temperatura - Abertura e Razões Equivalentes	113
Figura 65 – Modelo 21 (tabela 6) - Quantidade de Calor	114
Figura 66 – Modelo 21 (tabela 6) - Temperatura Adiabática - Limites e Controla- bilidade	114
Figura 67 – Modelo 22 (Tabela 6) - Controle Temperatura - Abertura e Razões Equivalentes	115
Figura 68 – Modelo 22 (Tabela 6) - Quantidade de Calor	116
Figura 69 – Modelo 22 (tabela 6) - Temperatura Adiabática - Limites e Controla- bilidade	116
Figura 70 – Modelo 23 (Tabela 6) - Controle Temperatura - Abertura e Razões Equivalentes	117
Figura 71 – Modelo 23 (Tabela 6) - Quantidade de Calor	118
Figura 72 – Modelo 23 (tabela 6) - Temperatura Adiabática - Limites e Controla- bilidade	118
Figura 73 – Modelo 24 (Tabela 6) - Controle Temperatura - Abertura e Razões Equivalentes	119
Figura 74 – Modelo 24 (Tabela 6) - Quantidade de Calor	120

Figura 75 – Modelo 24 (tabela 6) - Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade	120
Figura 76 – Modelo 25 (Tabela 6) - Controle Temperatura - Abertura e Razões Equivalentes	121
Figura 77 – Modelo 25 (Tabela 6) - Quantidade de Calor	122
Figura 78 – Modelo 25 (tabela 6) - Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade	122
Figura 79 – Modelo 26 (Tabela 6) - Controle Temperatura - Abertura e Razões Equivalentes	123
Figura 80 – Modelo 26 (Tabela 6) - Quantidade de Calor	124
Figura 81 – Modelo 26 (tabela 6) - Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade	124
Figura 82 – Modelo 27 (Tabela 6) - Controle Temperatura - Abertura e Razões Equivalentes	125
Figura 83 – Modelo 27 (Tabela 6) - Quantidade de Calor	126
Figura 84 – Modelo 27 (tabela 6) - Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade	126
Figura 85 – Modelo 28 (Tabela 6) - Controle Temperatura - Abertura e Razões Equivalentes	127
Figura 86 – Modelo 28 (Tabela 6) - Quantidade de Calor	128
Figura 87 – Modelo 28 (tabela 6) - Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade	128

Lista de tabelas

Tabela 1 – Faixas de Temperatura e conformação a quente dos materiais mais comuns ³	29
Tabela 2 – Resistência a conformação a quente (de 1000°C-1200°C) dos aços-carbono (baixo teor de C) ¹	30
Tabela 3 – Propriedades Substâncias GLP	41
Tabela 4 – Razões Equivalentes Φ	48
Tabela 5 – Dados para Análise de Compressibilidade	55
Tabela 6 – Características segundo Abertura do Cilindro Aspirador Razão Bocal = 0,3 ; Orifício = 0,8mm ; Comprimento Total = 250mm	59
Tabela 7 – Características segundo Razão do Bocal Abertura Total = 9mm ; Orifício = 0,8mm ; Comprimento Total = 250mm	63
Tabela 8 – Características Queimador Atmosférico Projetado	72

Lista de símbolos

$m_{C_xH_y}$	Massa Molar de um Hidrocarboneto [$\frac{kg}{kmol}$]
M_m	Massa Molar da mistura [$\frac{kg}{kmol}$]
$mf_{C_xH_y}$	Fração Mássica
$y_{C_xH_y}$	Fração Molar de um Hidrocarboneto
$N_{C_xH_y}$	Numero de Mols de um Hidrocarboneto
N_m	Numero de Mols da mistura [mols]
R_u	Constante universal dos gases [$\frac{J}{mol.K}$]
R_{GLP}	Constante do GLP [$\frac{J}{mol.K}$]
C_v	Calor específico a volume constante [$\frac{J}{kg.K}$]
C_p	Calor específico a pressão constante [$\frac{J}{kg.K}$]
ρ	Massa específica [$\frac{kg}{m^3}$]
P	Pressão [Pa]
P_{abs}	Pressão Absoluta [Pa]
P_{man}	Pressão Manométrica [Pa]
μ	Coeficiente de viscosidade dinâmica [Pa.s]
u	Velocidade [$\frac{m}{s}$]
g	Gravidade [$\frac{m}{s^2}$]
Z	Fator de compressibilidade
T	Temperatura [K] ou $^{\circ}C$
t	Tempo [s]
V	Volume [m^3]
U	Energia Interna [$\frac{KJ}{kg}$]
H	Entalpia [$\frac{J}{kg}$]

S	Entropia [$\frac{J}{kg}$]
γ ou k	Coeficiente de Expansão Adiabática
v	Volume específico [$\frac{m^3}{kg}$]
Φ	Razão Equivalente da Mistura
Φ_{est}	Razão Estequiométrica

Sumário

	Introdução	25
1	REFERENCIAL TEÓRICO	27
1.1	Forjamento	27
1.1.1	Aspectos Gerais do Processo	27
1.1.2	Características Térmicas de Operação	28
1.2	Queimadores Atmosféricos	30
1.2.1	Bico de Gicleur e Câmara de Mistura	32
1.2.2	Efeito Venturi	35
1.2.3	Reguladores de Pressão	38
1.3	Dinâmica e Propriedades do Fluido	39
1.3.1	GLP - Gás Liquefeito de Petróleo	39
1.3.2	Escoamento	42
1.3.2.1	Compressibilidade	42
1.4	Combustão	45
1.4.1	Temperatura Adiabática de Chama	45
1.4.2	Transferência de Calor	48
1.4.3	Fluxo Mássico	50
2	METODOLOGIA	51
2.1	Projeto	51
2.1.1	Análise Compressibilidade	53
2.1.2	Temperatura de Chama Adiabática - GLP	54
2.1.3	Velocidade de Saída Gás Combustível - Fluxo Mássico Primário	56
2.1.3.1	Quantidade de Calor Gerado	57
2.1.3.2	Tempo de Consumo e Fluxo Mássico Limite de Operação	57
2.1.4	Controle da mistura	58
2.1.4.1	Abertura	58
2.1.4.2	Bocal	63
2.1.5	Transferência de Calor para Ambiente	67
2.2	Construção	68
2.2.1	Recomendações de Projeto	68
3	RESULTADOS	71
3.1	Análise Numérica e Dimensionamento	71
3.2	Projeto Mecânico	75

3.2.1	Estimativa de Custos	75
3.2.2	Desenho Mecânico	76
3.2.2.1	Esquemático Vista Isométrica	77
3.2.2.2	Bocal	78
3.2.2.3	Cilindro Aspiração	79
3.2.2.4	Bucha 1	80
3.2.2.5	Tampa Cilindro Aspiração	81
3.2.2.6	Guia Duto Gás	82
3.2.2.7	Duto Gás	83
3.2.2.8	Anel	84
3.2.2.9	Ponta Niple	85
3.2.2.10	Bico Ejetor (Bico Solda MIG)	86
3.2.2.11	Cilindro Regulador	87
3.2.2.12	Câmara de Mistura dos Gases	88
3.2.2.13	Bucha 2	89

4 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS . 91

4.1 Conclusão . 91

4.2 Trabalhos Futuros . 92

REFERÊNCIAS . 93

APÊNDICES 95

APÊNDICE A – RESULTADOS EM FUNÇÃO DA ABERTURA . . 97

A.1 Modelo 11 . 97

A.1.1 Razão Mistura e Temperatura Adiabática de Chama em função da abertura 97

A.1.2 Quantidade de Calor 98

A.1.3 Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade 98

A.2 Modelo 12 . 99

A.2.1 Razão Mistura e Temperatura Adiabática de Chama em função da abertura 99

A.2.2 Quantidade de Calor 100

A.2.3 Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade 100

A.3 Modelo 13 . 101

A.3.1 Razão Mistura e Temperatura Adiabática de Chama em função da abertura 101

A.3.2 Quantidade de Calor 102

A.3.3 Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade 102

A.4 Modelo 14 . 103

A.4.1 Razão Mistura e Temperatura Adiabática de Chama em função da abertura 103

A.4.2	Quantidade de Calor	104
A.4.3	Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade	104
A.5	Modelo 15	105
A.5.1	Razão Mistura e Temperatura Adiabática de Chama em função da abertura	105
A.5.2	Quantidade de Calor	106
A.5.3	Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade	106
A.6	Modelo 16	107
A.6.1	Razão Mistura e Temperatura Adiabática de Chama em função da abertura	107
A.6.2	Quantidade de Calor	108
A.6.3	Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade	108
A.7	Modelo 17	109
A.7.1	Razão Mistura e Temperatura Adiabática de Chama em função da abertura	109
A.7.2	Quantidade de Calor	110
A.7.3	Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade	110
A.8	Modelo 18	111
A.8.1	Razão Mistura e Temperatura Adiabática de Chama em função da abertura	111
A.8.2	Quantidade de Calor	112
A.8.3	Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade	112

APÊNDICE B – RESULTADOS EM FUNÇÃO DA RAZÃO DO BOCAL 113

B.1	Modelo 21	113
B.1.1	Razão Mistura e Temperatura Adiabática de Chama em função da abertura	113
B.1.2	Quantidade de Calor	114
B.1.3	Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade	114
B.2	Modelo 22	115
B.2.1	Razão Mistura e Temperatura Adiabática de Chama em função da abertura	115
B.2.2	Quantidade de Calor	116
B.2.3	Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade	116
B.3	Modelo 23	117
B.3.1	Razão Mistura e Temperatura Adiabática de Chama em função da abertura	117
B.3.2	Quantidade de Calor	118
B.3.3	Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade	118
B.4	Modelo 24	119
B.4.1	Razão Mistura e Temperatura Adiabática de Chama em função da abertura	119
B.4.2	Quantidade de Calor	120
B.4.3	Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade	120
B.5	Modelo 25	121
B.5.1	Razão Mistura e Temperatura Adiabática de Chama em função da abertura	121
B.5.2	Quantidade de Calor	122

B.5.3	Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade	122
B.6	Modelo 26	123
B.6.1	Razão Mistura e Temperatura Adiabática de Chama em função da abertura	123
B.6.2	Quantidade de Calor	124
B.6.3	Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade	124
B.7	Modelo 27	125
B.7.1	Razão Mistura e Temperatura Adiabática de Chama em função da abertura	125
B.7.2	Quantidade de Calor	126
B.7.3	Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade	126
B.8	Modelo 28	127
B.8.1	Razão Mistura e Temperatura Adiabática de Chama em função da abertura	127
B.8.2	Quantidade de Calor	128
B.8.3	Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade	128

APÊNDICE C – CÓDIGOS MATLAB - DIMENSIONAMENTO PRE-LIMINAR 129

C.1	Código Principal: relaciona os demais códigos de cada função	129
C.2	Função: Calculo Temperatura Adiabática de Chama - Hidrocarboretos - Mistura pobre ou estequiométrica	157
C.3	Função: Fator de Compressibilidade baseado em Pressão Reduzida .	164
C.4	Função: Cálculo Propriedades C_p, C_v, K	166
C.5	Função: Quantidade de Calor	173

Introdução

Materiais metálicos submetidos ao processo de forjamento necessitam ser deformados mecanicamente e resfriados a temperaturas e intervalos de tempo especificados para que determinadas propriedades e características desejadas em cada projeto sejam alcançadas (BRESCIANI, 1991).

Para controlar esses parâmetros, é imprescindível o controle da temperatura dentro da câmara de combustão. Diferentes aplicações industriais exigem diferentes temperaturas operacionais (BAUKAL, 2003). Existem formas distintas de controlar a temperatura dentro da câmara de combustão e todos os projetos de fornos de forjamento com temperatura controlada exigirão controle da mistura (comburente e combustível) proveniente do queimador, para que seja possível controlar com maior qualidade e facilidade esta temperatura.

Em geral, os queimadores atmosféricos utilizados para a cutelaria não possuem controle da temperatura de chama bem definido. Como mencionado anteriormente, o processo apropriado de forjamento de peças necessita de controle dos parâmetros inerentes à conformação do material, e um dos principais parâmetros é a temperatura ao longo do processo. O controle e identificação da temperatura de chama resultante dos queimadores utilizados para cutelaria é feito por identificação visual da coloração de chama, a qual é controlada pela abertura do ar atmosférico aspirado pelo queimador.

Portanto, tendo como motivação o desenvolvimento de um queimador atmosférico com controle de temperatura, para que os processos de conformação do material sejam bem executados, assumindo a cutelaria como delimitadora do escopo de aplicação; este trabalho busca como objetivo (i) entender os importantes fatores associados ao controle da temperatura, (ii) suas limitações e (iii) projetar e desenvolver de forma clara e objetiva um queimador atmosférico com parâmetros bem definidos para o controle da temperatura adiabática de chama.

O sistema de aquecimento dos materiais para conformação mecânica é composto por um forno de forja (câmara de combustão) e um ou mais queimadores; os quais são componentes imprescindíveis para o controle da temperatura dentro do forno. A combustão envolve princípios físicos da transferência de calor, termodinâmica, química cinética e dinâmica dos fluidos, os quais são essenciais para delimitar completamente o escopo e requisitos deste projeto.

De acordo com os objetivos deste trabalho, sua estrutura foi organizada em 4 capítulos. O primeiro é responsável por contextualizar o leitor a respeito dos processos da conformação mecânica e seus requisitos, assim como apresentar o referencial teórico ne-

cessário para o entendimento físico que rege os princípios de funcionamento do queimador atmosférico e limitações operacionais associadas ao controle da pressão, disponibilidade da mistura gasosa comercializada (GLP). A partir do entendimento das funcionalidades de cada parte que compõem o queimador, como bico, bocal, regulador de pressão, câmara de mistura e efeitos associados a operação como compressibilidade, escoamento, controle do fluxo mássico e um breve entendimento das perdas de calor do forno (câmara de combustão) é possível criar uma metodologia de análise que permite dimensionar o queimador.

A metodologia de análise, assim como as recomendações construtivas para o dimensionamento e projeto do queimador são apresentadas no capítulo 2. Por meio de cálculos numéricos ao longo de varias faixas de pressão, abertura e diferentes configurações de bocal foi possível obter resultados numéricos de fluxo mássico final, quantidade de calor, autonomia (tempo de consumo), compressibilidade, temperatura de chama adiabática e parâmetros qualitativos de controlabilidade da temperatura de chama do queimador. Neste capítulo são apresentados resultados de alguns modelos com diferentes dimensionamentos de bocal e cilindro regulador, para que se torne mais fácil a compreensão do leitor em relação a influência de cada um. Ao final do trabalho, em apêndices, se encontram os resultados em forma de gráfico para todos os modelos utilizados para análise e comparação.

Os resultados finais do queimador atmosférico projetado são apresentados no capítulo 3, onde é possível observar as características obtidas para o queimador final, o qual atende a faixa de temperaturas de conformação mecânica a quente, requeridas para varias ligas metálicas. Também é apresentado uma breve análise de custos do queimador e por fim os desenhos técnicos do queimador projetado.

O capítulo 4 expõe as conclusões e possibilidades de trabalhos futuros para melhor dimensionamento, projeto e análises do queimador atmosférico apresentado neste trabalho.

1 Referencial Teórico

1.1 Forjamento

O projeto de todo e qualquer dispositivo dever possuir seu escopo delimitado pela sua aplicação e recursos disponíveis para o seu desenvolvimento. Queimadores a gás possuem diversas aplicações, e cada uma delas possui determinados requisitos e limitações, portanto é importante conhecer os conceitos básicos relacionados ao processo de conformação mecânica, chamado de forjamento, para o apropriado desenvolvimento de um queimador atmosférico a gás aplicado à cutelaria, arte de fazer ferramentas de corte através do forjamento.

1.1.1 Aspectos Gerais do Processo

O forjamento é um processo de conformação mecânica, o qual consiste na deformação plástica do material induzida por uma força ou tensão externa, este processo pode ser realizado em matriz fechada ou aberta, possui excepcionais estruturas granulares e boas propriedades mecânicas. (CALLISTER, 2016, p. 397,398)

Em geral o processo de forjamento é capaz de produzir peças mais resistentes, devido ao arranjo granular obtido a partir desse processo, se comparado com a fundição ou usinagem de um mesmo material (excluindo hipóteses em que hajam tratamentos térmicos posteriores).

O forjamento é o mais antigo dos processos de conformação plástica dos metais e ligas, foram encontrados adornos e objetos metálicos em sítios arqueológicos evidenciando que povos pré históricos (8000 A.C) já produziam artefatos em ouro e cobre por martelamento (FERREIRA, 2010). Embora o processo seja utilizado há milhares de anos e atualmente continuar sendo utilizado para a produção de facas, chaves, ferramentas, virabrequins automotivos, entre outros; há limitações quanto as geometrias que podem ser obtidas como resultado deste processo.

O processo de forjamento é subdividido em duas categorias: (i) forjamento livre ou em matriz aberta e (ii) forjamento em matriz fechada, como pode ser observado na fig. 1. A arte da cutelaria artesanal utiliza o processo de matriz aberta para conformação do material a quente, como pode ser visto no esquemático da fig.2.

Alguns materiais podem ser forjados a frio, embora ferros e aços geralmente necessitem de aquecimento para facilitar, ou mesmo permitir, o processo.

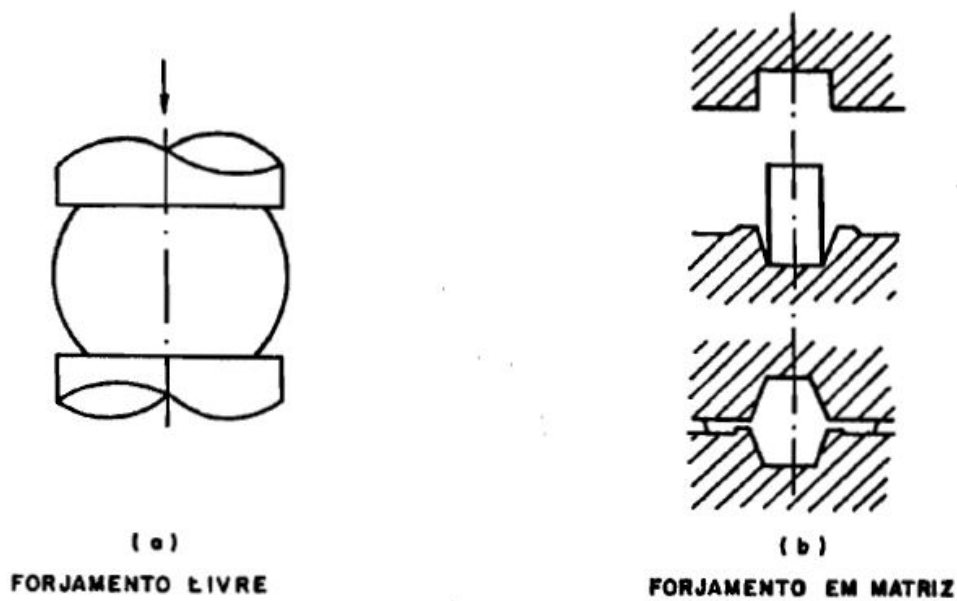


Figura 1 – Forjamento Livre e em Matriz - Ilustrado ([BRESCIANI, 1991](#))

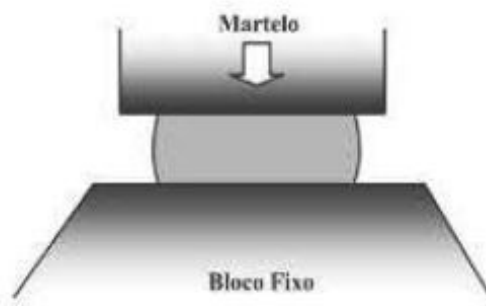


Figura 2 – Esquemático Forjamento Livre ([FERREIRA, 2010](#))

1.1.2 Características Térmicas de Operação

A temperatura de operação do processo consiste na temperatura do material no ato da conformação mecânica, a qual causará deformação plástica do material. Para que seja possível forjar a peça adequadamente durante o processo de conformação a quente, o metal precisa ser elevado à temperaturas tais que sua plasticidade (capacidade de deformação sem que haja ruptura) seja elevada do início ao final do processo; um parâmetro

relacionado ao fenômeno é a *forjabilidade do material*, a qual é elevada com a temperatura do material.

Os grãos dos materiais são modificados com a temperatura, à elevadas temperaturas de aquecimento os aços obtêm estruturas com grãos mais grossos. O forjamento é um processo capaz de refinar os grãos. O aquecimento dos aços podem atingir temperaturas de 1100°C a 1280°C, o que representa valores de 180°C a 200°C abaixo da temperatura de fusão. As temperaturas finais do processo de forjamento podem prejudicar a estrutura granular dos aços se excessivamente elevada, pois os grãos podem crescer durante o esfriamento da peça se as temperaturas finais de forjamento ultrapassarem temperaturas na faixa de 900°C, além de haver possibilidade de descarbonetação e queima do material.

As temperaturas de operação tem forte relação com a qualidade da peça, portanto temperaturas abaixo das temperaturas de processamento estabelecidas para cada metal comprometem a qualidade final da peça e a estrutura granular do material, pois a baixas temperaturas há encruamento do material. O encruamento do material pode ser eliminado com tratamento térmico posterior, todavia não há possibilidade de eliminar as fissuras provenientes do processo a baixas temperaturas, o que está relacionado com os planos cristalinos e fase do material.(BRESCHIANI, 1991)

Na Tabela (1) é possível observar as temperaturas de forjamento para os metais mais comuns.

Tabela 1 – Faixas de Temperatura e conformação a quente dos materiais mais comuns ¹

Material	Faixa de Temperatura [°C]
Ligas de Alumínio	320 - 520
Ligas de Cobre (Latões)	650 - 850
Aços de Baixo Teor de C	900 - 1150
Aços de Médio Teor de C	850 - 1100
Aços de Alto Teor de C	800 - 1050
Aço-Liga com Mn ou Ni	850 - 1100
Aço-Liga com Cr ou Cr-Ni	870 - 1100
Aço-Liga com Cr-Mo	850 - 1050
Aço Inoxidável (18/8)	750 - 1100

Há fatores inerentes ao processo de forjamento, como no caso da cutelaria em que o material é frequentemente retirado do forno para ser submetido a conformação mecânica, tem-se a influência da temperatura adjacente à superfície da peça que sofre bruscas variações em determinados intervalos de tempo; conseqüentemente a formação de grãos e propagação do calor na peça sofrem significativas variações em pequenos intervalos de tempo.

A velocidade de deformação, taxa de deformação; ou seja, tempo em que o metal é imposto a uma força que gera deformação é um fator importante, o qual possui de-

terminadas diferenças entre processos de fabricação por conformação mecânica por meio de esforços dinâmicos ou graduais. Para a cutelaria, em geral são aplicados esforços dinâmicos, os quais possuem maior resistência à deformação, se comparados aos esforços graduais aplicados em prensas. A diferença de resistência à deformação pode chegar a razões de 2,5 (Tab.2).

Tabela 2 – Resistência a conformação a quente (de 1000°C-1200°C) dos aços-carbono (baixo teor de C) ¹

Deformação Logarítma (%)	Resistência à Conformação Mecânica (MPa)
Ação Dinâmica do Martelo	
0 - 10	100 - 150
10 - 20	150 - 200
20 - 40	200 - 300
40 - 60	300 - 360
mais que 60	360 - 500
Ação Gradual da Prensa Hidráulica	
0 - 10	40 - 60
10 - 20	60 - 120
20 - 40	120 - 220
40 - 60	220 - 280
mais que 60	280 - 380

Grande parte das peças forjadas passam por processos de tratamento térmico posterior, entre eles a normalização e recozimento, processos os quais para aços variam entre 750°C a 900°C dependendo do teor de carbono. O tratamento térmico permite refinar o grão obtido pelo forjamento a altas temperaturas e remover as tensões internas introduzidas durante o trabalho a quente do material.

Esses tratamentos térmicos podem resultar em maior ductilidade do material reduzindo um pouco a fragilidade do mesmo. Todavia, a normalização, que consiste no aquecimento do aço forjado em forno e resfriamento ao ar livre, resulta em maior grau de refinamento dos grãos do que o processo de recozimento; além de propriedades mecânicas melhoradas (para utilizações gerais, pois as propriedades mecânicas são consideradas desejáveis distintamente para cada aplicação) , e das tensões internas removidas (BRESCIANI, 1991).

1.2 Queimadores Atmosféricos

O queimador é um componente extremamente importante para o funcionamento adequado do sistema, existem queimadores com diferentes métodos de mistura do combustível e comburente (oxidante), assim como entrada de ar. O queimador proposto para

¹ Tabelas 1 e 2 - (BRESCIANI, 1991)

o presente trabalho é do tipo atmosférico, o qual tem a entrada de ar atmosférico forçada pela diferença de pressão criada entre a garganta do bocal de entrada e a pressão atmosférica (Efeito Venturi) como ilustrado na figura 3.

A partir do dimensionamento e limitação da operação a regimes incompressíveis (como demonstrado na seção 1.3.2.1), para efeitos práticos e de cálculos preliminares, desconsiderar efeitos viscosos é uma boa alternativa para se obter estimativas iniciais e resultados práticos razoáveis, portanto pode-se utilizar da Eq. (1.20) de Bernoulli. Considerando que a diferença de altura entre a entrada de ar do queimador e a saída é negligenciável, pode-se considerar a energia potencial gravitacional do fluido nula. A velocidade do ar na atmosfera adjacente à entrada de ar do queimador é nula, portanto

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 + \rho gh_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 + \rho gh_2 \quad (1.1)$$

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho \cancel{V_1^2} + \rho g \cancel{h_1} = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 + \rho g \cancel{h_2}$$

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{1}{2}\rho V_2^2 \quad (1.2)$$

O que significa que a diferença de pressão é função da velocidade na garganta, consequentemente da saída do GLP, e como consequência a velocidade do fluxo secundário (ar atmosférico) será função da razão entre a área do bocal na região 2 e da garganta na região 3 da Fig. (15). A razão equivalente Φ será função da abertura do controle de vazão do fluxo secundário. Em resumo, o dimensionamento do bocal é responsável pelo potencial de aspiração do ar atmosférico do queimador, e o controle da mistura é feito pela abertura da entrada do fluxo mássico secundário (ar).

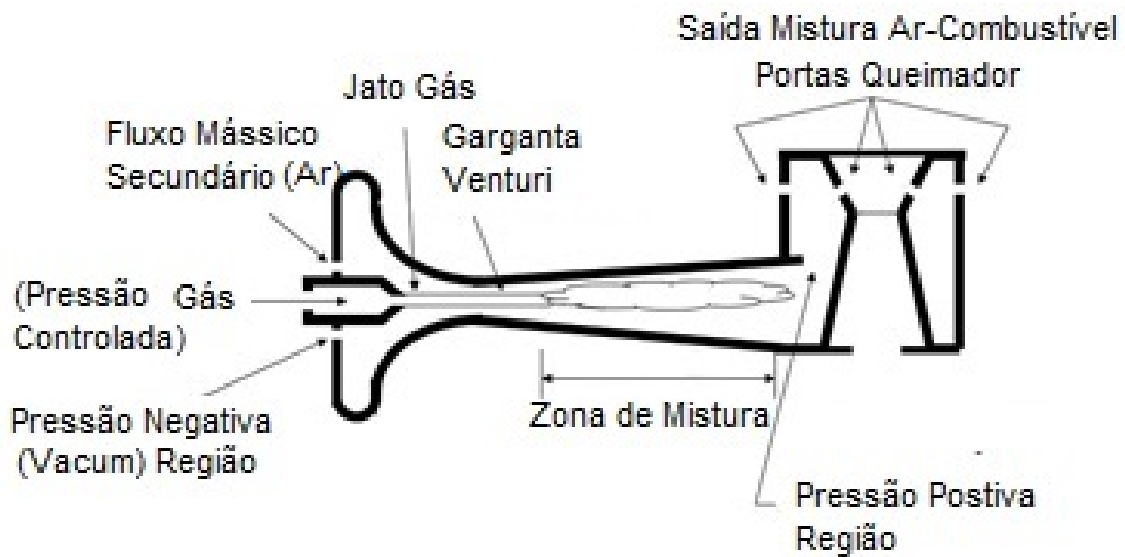


Figura 3 – Princípio Funcionamento Queimador Atmosférico ¹ - Adaptado

¹ "Queimador Atmosférico" Acessado em 03/06/2018

1.2.1 Bico de Gicleur e Câmara de Mistura

Para o funcionamento do sistema deve-se obter velocidades controladas e conhecidas no orifício de saída do gás combustível na região 3 da Fig. (15), é possível controlar tais velocidades a partir do controle da pressão de saída do cilindro de armazenamento. O controle desse fluxo mássico primário é responsável por modificar a quantidade de calor total na saída do queimador. (BERRY I. V. BRUMBAUGH, September, 1921)

O desenho e formato do duto que conduz o escoamento diretamente para este orifício tem significativa influência no projeto e está relacionado à perda de carga devido ao estrangulamento do fluido que escoar através do duto.

A saída do gás, ou seja, posicionamento do orifício em relação à garganta também tem influência e deve receber a devida atenção.

É possível observar, nas Figs. (4) e (5) como pode se obter diferentes configurações de projeto em relação ao bico injetor de gás e câmara de mistura. São trabalhos experimentais realizados no início do século XX a respeito de queimadores atmosféricos (BERRY I. V. BRUMBAUGH, September, 1921).

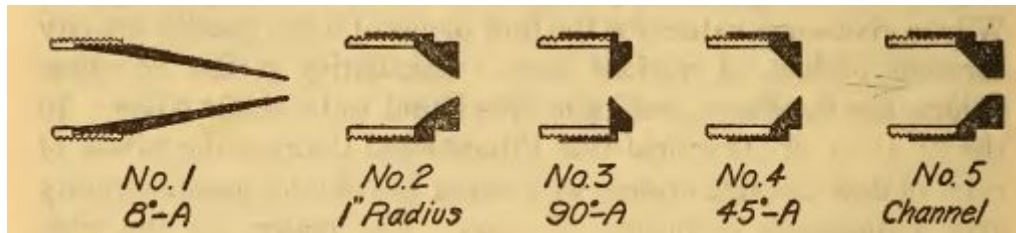


Figura 4 – Bicos injetores - Fonte: (BERRY I. V. BRUMBAUGH, September, 1921)

Alguns fatores são bem importantes no dimensionamento de um queimador atmosférico, entretanto são objetos de estudo de pesquisas dedicadas a cada aspecto. Todavia, a otimização e estudo dessas diferentes configurações e posicionamentos não é objeto de estudo deste presente trabalho. Estudos posteriores a respeito desses fatores podem ser realizados a partir do queimador neste desenvolvido, já que o projeto mecânico será desenvolvido de forma que o formato dos bicos e o posicionamento dele em relação a garganta poderão ser modificados para análises experimentais posteriores.

Para o cálculo da velocidade de saída dos gases combustíveis, a partir da primeira lei da termodinâmica ou relação de balanço de energia, a qual é bem explicada em (CENGEL, 2015b), é possível desenvolver as equações necessárias para o cálculo da velocidade na saída do orifício. Considerando um fluido em regime permanente escoando através de um duto com paredes impermeáveis de área A_0 e com orifício em seu final perfeitamente circular de área A_1 onde $A_0 \gg A_1$. P_1 e P_0 são as pressões totais, T_1 e T_0 são as temperaturas absolutas e $v_1, v_0; U_1, U_0; E_{cin1}, E_{cin0}$ são respectivamente o volume específico, energia interna e energia cinética. Q será a quantidade de calor adicionada pela diferença de tem-

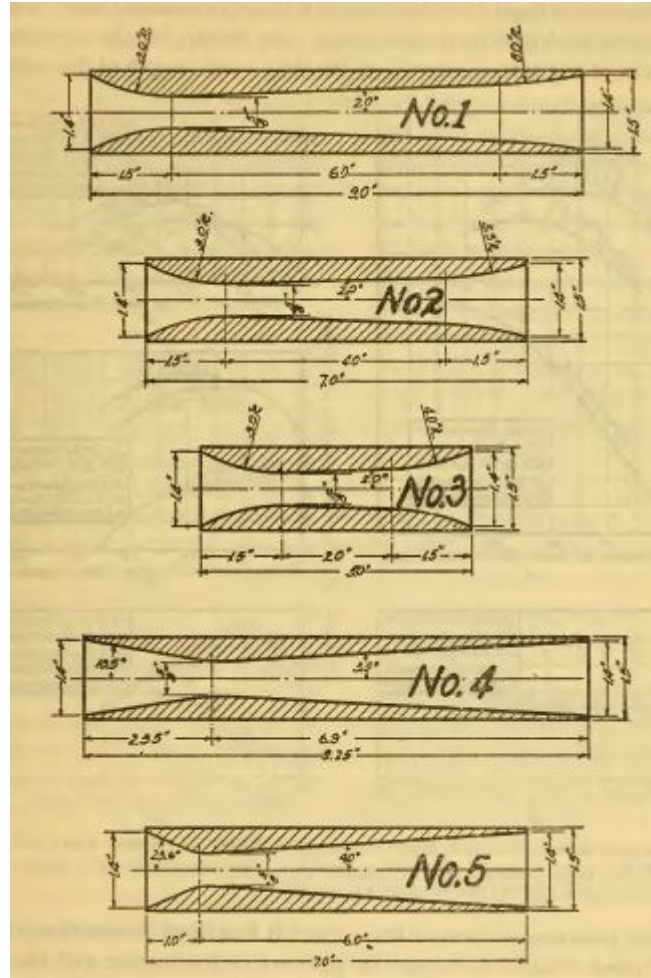


Figura 5 – Dutos - Estágio Mistura - Fonte: (BERRY I. V. BRUMBAUGH, September, 1921)

peratura com o ambiente, excluindo e desconsiderando o calor gerado por fricção ao longo do duto devido a efeito viscosos e outras resistências do escoamento (BUCKINGHAM; EDWARDS, January, 1920). Da Equação (1.3) tem-se o balanço energético.

$$(Q_{in} - Q_{out}) + (W_{in} - W_{out}) + m \left((U_0 - U_1) + (P_0 V_0 - P_1 V_1) + \left(\frac{u_0^2}{2} - \frac{u_1^2}{2} \right) + g(Z_0 - Z_1) \right) = 0 \quad (1.3)$$

Se o orifício na saída do gás for suficientemente circular não há contração (BUCKINGHAM; EDWARDS, January, 1920), e considerando que a velocidade na saída do bico seja menor ou igual a 0,3 mach (ANDERSON, 2003), não haverá compressibilidade do fluido ao longo do escoamento.

¹ Vale observar que devido ao fato do trabalho "Efflux of gases through small orifices, bureau of standards paper n°359, 1920" ser do início da década de 1920, este considera escoamento incompressível para velocidades abaixo da velocidade do som daquele respectivo gás; todavia trabalhos e livros mais recentes como "Fundamentals of Aerodynamics, 2011" e "Modern Compressible Flow, 2003" deixam claro que se pode considerar escoamento incompressível para velocidades abaixo ou igual a 0,3 mach.

Considerando a velocidade do escoamento ao longo do duto, em A_0 muito lenta em relação a velocidade em A_1 , então a energia cinética em A_0 pode ser negligenciada e

$$m \frac{u_1^2}{2} = m(U_0 - U_1) + m(P_0 V_0 - P_1 V_1) - mg(Z_1 - Z_0) + Q \quad (1.4)$$

ou

$$m \frac{u_1^2}{2} = m(U_0 - U_1) + m[(P_0 V_0 - P_1 V_1) - g(Z_1 - Z_0)] + Q \quad (1.5)$$

Considerando o gás como ideal, o que poderá ser feito através da análise do fator de compressibilidade, e como

$$dh = C_p dT \quad (1.6)$$

$$H = U + PV \quad (1.7)$$

$$U = C_v dT \quad (1.8)$$

$$C_v = C_p - R_{gas} \quad (1.9)$$

$$(1.10)$$

$$\frac{u_1^2}{2} = (T_0 - T_1)C_p + Q \quad (1.11)$$

Por fim, supondo escoamento adiabático e sem resistências e geração de calor pelo escoamento ou dissipação de energia, tem-se então a expansão isentrópica do gás a partir de sua pressão inicial P_0 até a pressão P_1 na saída do orifício; assim sendo, pelas equações para escoamento isentrópico:

$$PV^\gamma = const \quad (1.12)$$

$$TV^{\gamma-1} = const \quad (1.13)$$

$$\left(\frac{T_1}{T_0}\right) = \left(\frac{P_1}{P_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (1.14)$$

$$(1.15)$$

Pela Eq. (1.11) do escoamento adiabático de um gás tem-se:

$$\frac{u_1^2}{2} = T_0 C_p \left[1 - \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \quad (1.16)$$

e a partir das relações das Eqs. (1.6),(1.7),(1.8) e (1.9) chega-se a Eq. (1.17) que possibilita o cálculo da velocidade do gás na saída do orifício (BUCKINGHAM; EDWARDS, January, 1920).

$$u_1 = \sqrt{2 \left(\frac{P_1}{\rho_0} \right) \frac{1 - \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \quad (1.17)$$

onde P_1 é a pressão externa P_{atm} , também chamada de pressão barométrica e P_0 é a pressão absoluta interna $P_0 = P_{atm} + P_{man}$ ou pressão interna do cilindro, câmara de gás.

1.2.2 Efeito Venturi

O *Efeito Venturi* é responsável por acelerar o escoamento ao longo do bocal e consequentemente aumentar o potencial do queimador de atingir maiores variações de misturas associado ao controle de abertura da passagem do fluxo mássico secundário (ar).

Considerando o escoamento através de um duto é possível fazer a análise ao longo do comprimento do duto unidimensional, evitando a complexidade algébrica associada aos cálculos tridimensionais sem perdas consideráveis nos resultados obtidos. Essa aproximação é chamada de *Escoamento Quasi-Unidimensional*, a qual pode ser vista na Fig. (6), entrega resultados com boa acurácia para a maioria das aplicações (ANDERSON, 2011).

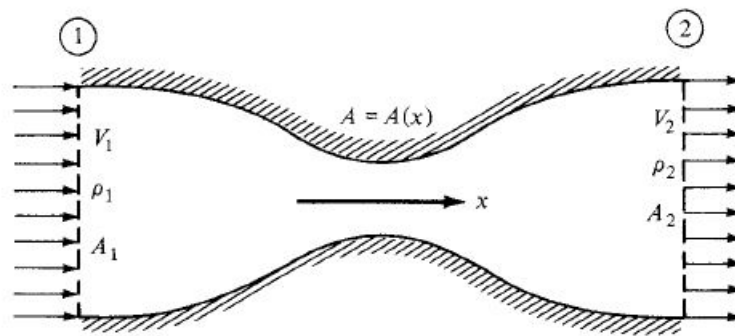


Figura 6 – Escoamento Quasi-Unidimensional (ANDERSON, 2011)

As relações de velocidade e pressão na entrada e saída de um Bocal(Duto Convergente) ou Difusor(Duto Divergente) para escoamentos incompressíveis subsônicos podem ser vistas na Fig. (7). Esses fenômenos potencializam o *Efeito Venturi*, que é a diferença de pressão criada pelo escoamento forçado de gás na entrada da câmara de mistura.

A Equação (1.18) descreve a conservação da massa ao longo do escoamento através do duto e pode ser aplicada tanto a escoamentos incompressíveis, quanto compressíveis,

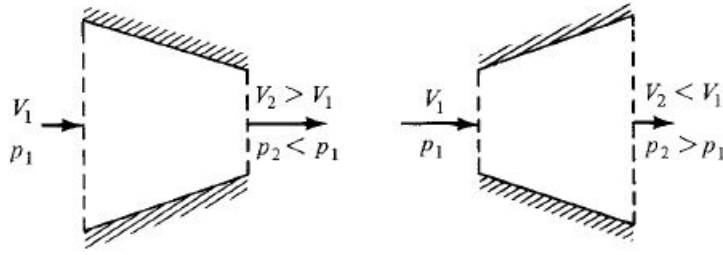


Figura 7 – Escoamento Incompressível em duto convergente e divergente respectivamente (ANDERSON, 2011)

já que considerando a influência da massa específica ρ em ambas as regiões do escoamento

$$\rho_1 A_1 u_1 = \rho_2 A_2 u_2 \quad (1.18)$$

que para escoamentos incompressíveis se torna na Eq. (1.19)

$$A_1 u_1 = A_2 u_2 \quad (1.19)$$

A Equação (1.19) demonstra que o fluxo volumétrico $[\frac{m^3}{s}]$ é constante ao longo do duto e enquanto a área diminui, a velocidade aumenta e vice versa como pode ser observado no esquemático da Fig. (7).

A pressão também sofre influência ao longo do duto, como pode ser observado na Fig. (8) onde é possível perceber que a pressão varia ao longo de um duto convergente-divergente e é mínima na região de menor área, também chamada de garganta. Neste ponto a velocidade é máxima. Esse duto é chamado de "*Venturi*" e a diferença de pressão ou aumento de velocidade são efeitos criados no escoamento, e são esses os fatores utilizados em diversas aplicações da engenharia como em carburadores automotivos, tubos de pitot (para medir a velocidade).

O queimador atmosférico tem o mesmo princípio de funcionamento do carburador automotivo, onde a diferença de pressão $P_1 - P_2$ criada pelo combustível que é lançado diretamente na garganta do duto chamado de Venturi. Devido ao fato de P_2 ser menor que a pressão ambiente P_1 , é criada a diferença de pressão que ajuda a forçar a entrada de ar atmosférico para formar a mistura gasosa que comporá a mistura equivalente para queima (ANDERSON, 2011).

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho u_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho u_2^2 \quad (1.20)$$

A partir da Equação (1.18) da continuidade e Eq. (1.20) de Bernoulli é possível obter as seguintes relações que permitirão calcular a velocidade do fluxo mássico secun-

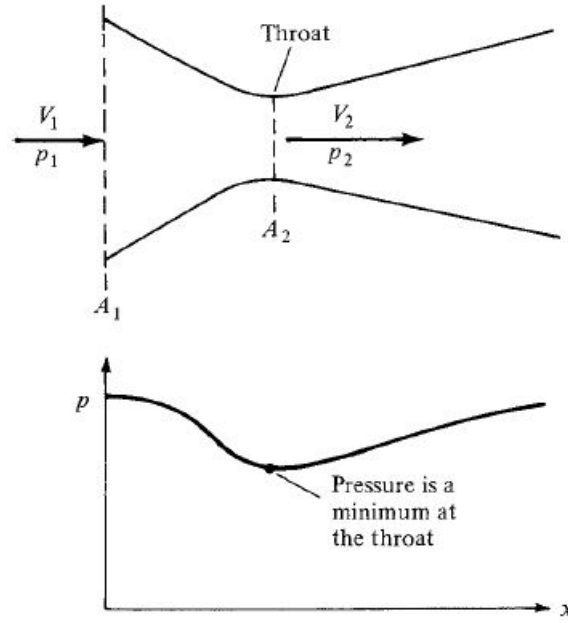


Figura 8 – Relações Área e Pressão (ANDERSON, 2011)

dário a partir da velocidade do fluxo mássico primário calculado a partir da Eq. (1.17) (BERRY I. V. BRUMBAUGH, September, 1921).

$$u_1^2 = \frac{2}{\rho}(P_2 - P_1) + u_2^2 \quad (1.21)$$

a partir da equação 1.19 para escoamentos incompressíveis, tem-se que

$$u_2 = \frac{A_1}{A_2} u_1 \quad (1.22)$$

substituindo a equação 1.22 na 1.21

$$u_1^2 = \frac{2}{\rho}(P_2 - P_1) + \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 u_1^2 \quad (1.23)$$

Por fim, colocando a Eq. (1.23) em função de u_1 que é a velocidade do fluxo mássico secundário.

$$u_1 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho \left[\left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 - 1 \right]}} \quad (1.24)$$

A diferença de pressão na região da garganta pode ser encontrada a partir da Eq. (1.20) de Bernoulli, já que a velocidade do ar presente na atmosfera pode ser considerada nula para encontrar a diferença de pressão entre a atmosférica e garganta.

1.2.3 Reguladores de Pressão

Reguladores de pressão são dispositivos responsáveis por manter a pressão de saída constante, independentemente da variação de pressão a jusante do regulador ou variações a vazante deste. Eles podem ser de estágio simples ou multiestágios, todavia os princípios operacionais e objetivos são os mesmos. (ZAFER, 2008).

O regulador de estágio simples reduz a pressão de gases comprimidos em um cilindro através de um conjunto obturador encapsulado e geralmente possui um manômetro de alta pressão (o qual indica a pressão interna do cilindro) e outro de baixa pressão (o qual indica a pressão ajustada para operação).

O regulador de duplo estágio tem o mesmo princípio de funcionamento, embora a redução da pressão ocorra em dois estágios, de modo que ocorra de forma mais suave e possa influenciar menos em possíveis variações das propriedades do fluido.

Os reguladores de pressão são necessários para que seja possível controlar de forma apropriada a velocidade do gás na saída do orifício, conseqüentemente controlar o fluxo mássico e portanto a quantidade de calor gerada pelo queimador na saída do difusor (Fig. 3).

Para o gás GLP podemos utilizar tanto o regulador de simples estágio para cilindros, quanto o regulador de duplo estágio para cilindros.



Figura 9 – Regulador de Pressão²

Ao longo do desenvolvimento do queimador, um grande desafio pode ser encontrar um regulador de pressão com variações suficientemente pequenas para que seja possível controlar o fluxo mássico de forma apropriada. Modelos das marcas Vortech e Harris foram avaliados e pesquisados para o presente trabalho e a melhor solução encontrada foi o modelo Harris 510 com manômetro de variação 0,05 Bar como o da Fig. (10).

² Grabcad, acessado 03/06/2018



Figura 10 – Regulador de Pressão Harris

1.3 Dinâmica e Propriedades do Fluido

A dinâmica dos gases ao longo do desenvolvimento deve ser abordada com bastante atenção, pois há condições de estado do fluido que dependem da temperatura e pressão, assim como diferenças no comportamento do escoamento sofridas devido a alterações de velocidade e pressão de operação.

1.3.1 GLP - Gás Liquefeito de Petróleo

O GLP é um composto orgânico formado por hidrocarbonetos (Carbono e Hidrogênio) e sua composição pode variar de acordo com a fonte de obtenção do mesmo. De acordo com o segundo artigo da Resolução da ANP ([ANP AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, 2004](#)), os Gases Liquefeitos de Petróleo - GLP classificam-se em:

(i) Propano Comercial - mistura de hidrocarbonetos contendo predominantemente propano e/ ou propeno.

(ii) Butano Comercial - mistura de hidrocarbonetos contendo predominantemente butano e/ ou buteno.

(iii) Propano / Butano - mistura de hidrocarbonetos contendo predominantemente, em percentuais variáveis, propano e/ou propeno e butano e/ou buteno.

(iv) Propano Especial - mistura de hidrocarbonetos contendo no mínimo 90% de propano em volume e no máximo 5% de propeno em volume.

Devido as diferenças na composição do GLP permitidas por lei, os resultados referentes a temperatura adiabática de chama encontrados nos testes podem conter desvios, todavia tal fator é inerente ao mercado e acessibilidade das composições disponíveis desse tipo de combustível, portanto para realizar os cálculos e delimitar o escopo do projeto, será utilizado a composição encontrada por um dos fornecedores no mercado nacional, no caso a Fogás, já que composição do GLP fornecido é disponibilizada pela Fogás (vale salientar que podem haver variações de acordo com a fonte do suprimento). Caso a aplicação do projeto exija um nível ainda maior de controle e precisão, cabe ao projetista restringir o tipo de combustível de forma explícita e rigorosa aos usuários do dispositivo.

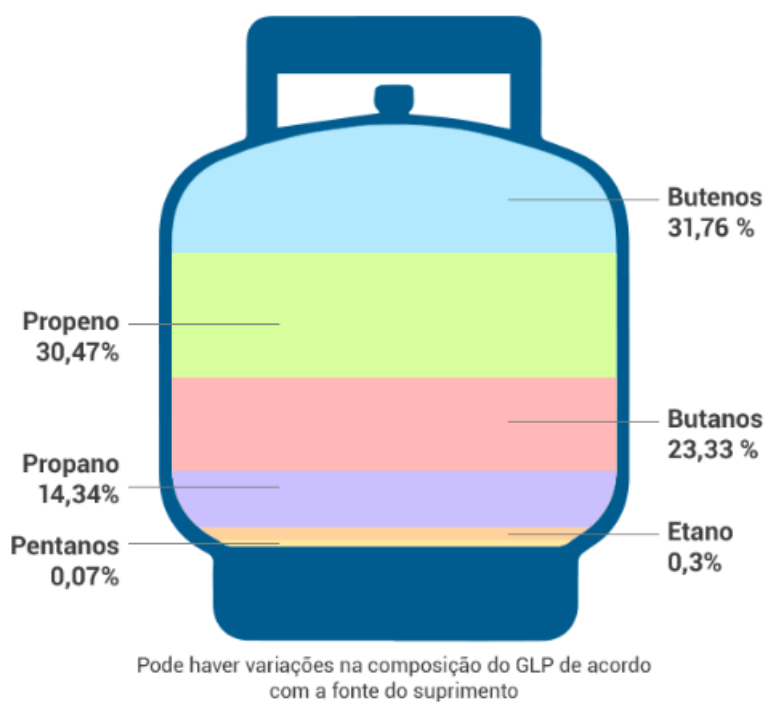


Figura 11 – Composição Hidrocarbonetos - GLP ³

³ (FOGÁS,)

- Butano $\Rightarrow C_4H_{10}$ (23,33 %)
- Propano $\rightarrow C_3H_8$ (14,34%)
- Buteno $\Rightarrow C_4H_8$ (31,76%)
- Propeno $\Rightarrow C_3H_6$ (30,47%)

Tabela 3 – Propriedades Substâncias GLP

		GLP	C4H10	C3H8	C4H8	C3H6	CO	CO2	H2O	N2	O2	AR
m	Massa Molar [$\frac{Kg}{Kmol}$]	50,42	58	44	56	42	28	44	18	28	32	28,84
$\Phi_{C_xH_y}$	Razão Estequiométrica	-	15,38	15,6	14,7	14,7	-	-	-	-	-	-
T_{crit}	Temperatura Crítica [K]	-	407,7	369,9	419	365,2	133	304,2	647,1	126,2	154,8	132,5
P_{crit}	Pressão Crítica [MPa]	-	3,65	4,25	4,02	4,6	3,5	7,39	22,06	3,39	5,08	3,77
upsilon	Volume Específico Crítico [$\frac{m^3}{Kmol}$]	-	0,259	0,2	0,2408	0,1846	-	-	-	-	-	-

Os dados referentes a composição da mistura de GLP e ponto crítico de cada componente na Tab. (3) possibilitam calcular a temperatura e pressão reduzida para checar o fator de compressibilidade da mistura gasosa segundo o diagrama de Nelson Obert da Fig. (12). Os dados referentes aos outros componentes que não compõem a mistura gasosa são necessários para cálculos a respeito do escoamento e temperatura de chama.

Pela equação polinomial (Eq.1.25) e seus respectivos coeficientes disponíveis em (MCBRIDE; RENO, 1993) é possível calcular C_p e C_v e coeficiente de expansão adiabática γ , ou também representado por k.

$$C_p = Ru.(a_1 + a_2.T + a_3.T^2 + a_4.T^3 + a_5.T^4) \quad (1.25)$$

$$C_p = \sum_{i=1}^k m f_i C_{p,i} \quad (1.26)$$

$$C_v = C_p - R_{gas} \quad (1.27)$$

$$C_v = \sum_{i=1}^k m f_i C_{v,i} \quad (1.28)$$

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (1.29)$$

Para o cálculo das propriedades extensivas de misturas ideais e reais, basta calcular a contribuição de cada componente da mistura como energia interna total, entalpia e

entropia de um gás, as quais podem ser expressas da seguinte maneira (CENGEL, 2015b, Capítulo 13):

$$U_{mistura} = \sum_{i=1}^k m f_i \cdot U_i \quad (1.30)$$

$$H_{mistura} = \sum_{i=1}^k m f_i \cdot H_i \quad (1.31)$$

$$S_{mistura} = \sum_{i=1}^k m f_i \cdot S_i \quad (1.32)$$

onde $m f_i = \frac{m_i}{m_{mistura}}$ é a fração massica de cada componente.

1.3.2 Escoamento

A análise completa de qualquer escoamento envolve vários fenômenos a respeito do movimento das partículas ao longo de diferentes meios. Todos os conceitos envolvidos ao comportamento de um fluido devem ser levados em consideração. Compressibilidade, vorticidade, camada limite, perda de carga em tubulações devido a efeitos dissipativos do transporte do fluido em questão, velocidade, temperatura e pressão são objetos de vários estudos nesta área; ao longo do desenvolvimento deste trabalho levar-se-á em consideração tudo aquilo que é relevante para o desenvolvimento de um queimador atmosférico com controle de temperatura, assim como as considerações necessárias para a aplicação em fornos de forjamento de cutelaria.

Previamente, nas seções as quais descreveram alguns dos dispositivos que compõem o queimador foram descritas as teorias e fatores que servem de base para a análise da transformação de energia cinética em energia interna e vice versa ao longo do escoamento. A análise da compressibilidade dos gases ao longo dos sistemas que compõem o queimador atmosférico; aceleração, desaceleração e a elevação ou atenuação da pressão total do ao longo do escoamento também é de suma importância para o desenvolvimento deste trabalho e depende de propriedades específicas da cada gás utilizado, portanto segue análise para o gás GLP.

1.3.2.1 Compressibilidade

A pressão e o volume são propriedades muito importantes ao longo do desenvolvimento do escoamento, e por se tratar de misturas gasosas deve-se ter preocupação com essas propriedades e como podem ser determinadas ao longo de escoamento. Tratar-se-á esta questão a partir da *lei de Dalton das pressões aditivas* e *Lei de Amagat dos Volumes*

aditivos(CENGEL, 2015b, Capítulo 13), a qual é exata para gases ideais e aproximada para gases reais.

$$\text{Lei de Dalton} \quad P_m = \sum_{i=1}^k P_i(T_m, V_m) \quad (1.33)$$

$$\text{Lei de Amagat} \quad V_m = \sum_{i=1}^k V_i(T_m, V_m) \quad (1.34)$$

Essas duas leis podem ser utilizadas para analisar o comportamento P-*v*-T das misturas de gases reais com boa aproximação, embora as pressões e volumes dos componentes devam ser avaliados levando em conta o desvio de cada um dos componentes que compõem a mistura. Pode-se utilizar o fator de compressibilidade de cada componente ou utilizar equações de estado mais exatas como van der Waals, Beattie-Bridgeman, Benedict-Webb-Rubin ou tratar a substância como pseudopura e utilizar o método proposto por W.B..Kay chamado *Regra de Kay* que envolve a pressão pseudocrítica $P'_{cr,m}$ e temperatura pseudocrítica $T'_{cr,m}$, o qual fornece resultados com erro na faixa de 10%, o que é aceitável para a maioria das finalidades de engenharia.

Sabendo que a fração mássica é $mf_i = \frac{m_i}{m_m}$ e fração molar é $y_i = \frac{N_i}{N_m}$ de cada componente, onde m_m e N_m representam respectivamente a massa total e número de mols da mistura composta por seus componentes i .

O primeiro fator a ser analisado para o fluido nas seguintes condições é a sua compressibilidade, já que a partir desta pode-se assumir ou não a relação de gás ideal para as diversas etapas do sistema em que o gás passará. Além de complementar a análise sobre a compressibilidade do escoamento, já que escoamentos compressíveis devem levar em conta a variação da massa específica do fluido ao longo do processo.

O sistema possui vários estágios e em cada um deles o fluido deve ser avaliado quanto ao seu estado, segundo temperatura e pressão total.

O fator de compressibilidade é dado por:

$$Z = \frac{Pv}{RT} = \frac{V_{real}}{V_{ideal}} \quad (1.35)$$

Onde para gases ideais $Z = 1$.

Diz-se que gases a baixas pressões e altas temperaturas obedecem a relação dos gases ideais e geralmente possuem erro menor que 1% (CENGEL, 2015b). Mas de fato, o que delimita essa relação entre o que é baixa pressão e alta temperatura para determinado gás é a razão entre a propriedade de estado do gás e sua propriedade de estado crítico, conhecidas por pressão e temperatura reduzida. Vale alertar sobre o perigo de se utilizar a pressão manométrica para esses cálculos, o que pode incorrer em erros substanciais

dependendo da situação e faixa de pressão operacional em que se deseja submeter o queimador, já que o fator de compressibilidade do gás deve ser calculado a partir da pressão absoluta.

O Diagrama Generalizado de Compressibilidade dos gases é determinado experimentalmente e representado em função de $P_{reduzida}$ e $T_{reduzida}$ como pode ser observado na Fig. (12). A pressão e temperatura reduzida dos gases em questão podem ser calculadas a partir da razão entre o valor de operação da propriedade e o valor crítico da propriedade, chamadas de Pressão e Temperatura Crítica presentes na Tab. (3) ou encontrados em fontes confiáveis como "*National Institute of Standards and Technologies*"⁴. Como o fator de compressibilidade para todos os gases é aproximadamente igual a mesma pressão e temperatura reduzida, pode-se utilizar o diagrama geral de compressibilidade para averiguar o fator de compressibilidade, para o respectivo gás de interesse, sem erro significativo associado; isto é dado pelo princípio dos estados correspondentes.

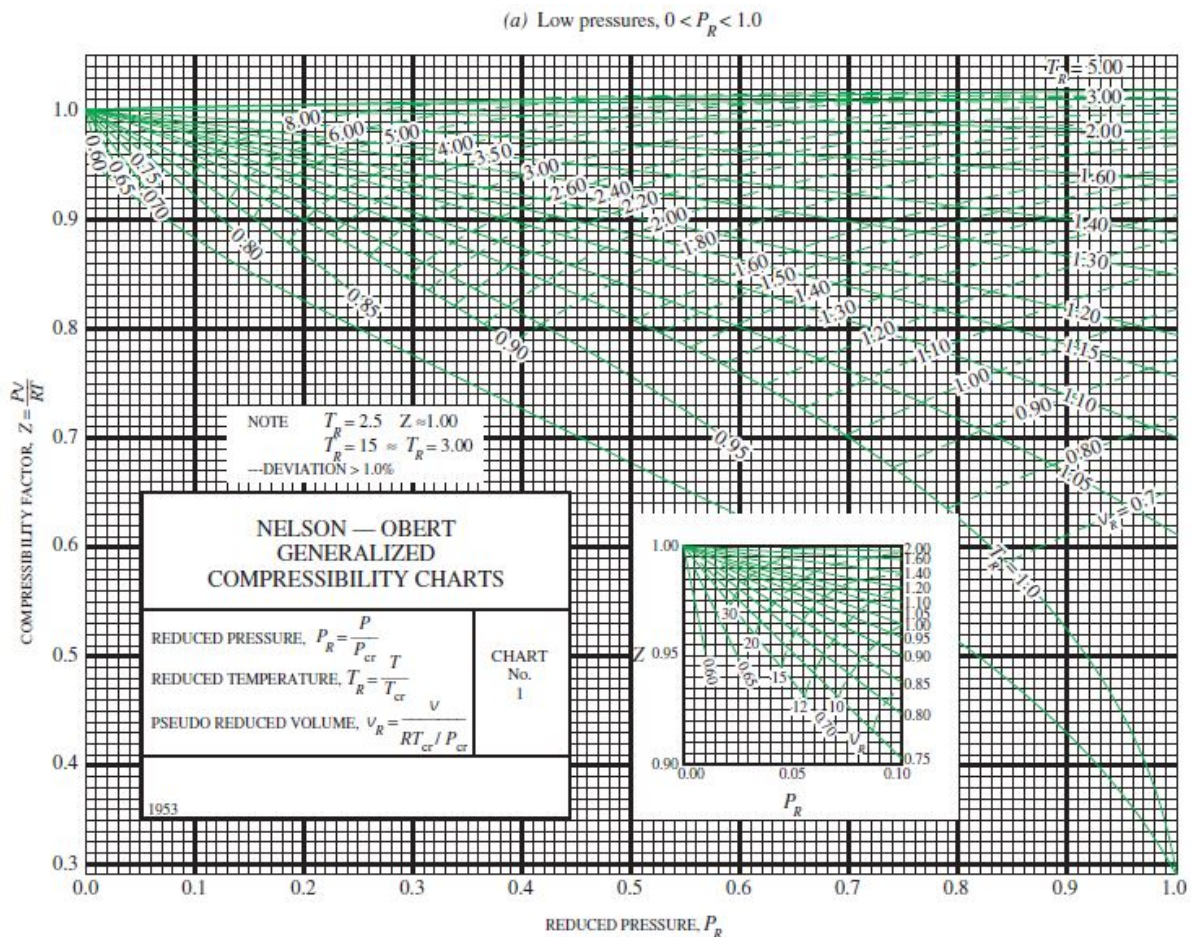


Figura 12 – Diagrama Generalizado de Compressibilidade de Nelson-Obert - (CENGEL, 2015b)

Embora seja importante a análise da compressibilidade pelo *fator de compressibilidade* citado acima, quando há movimento e altas velocidades envolvidas no escoamento,

⁴ <https://www.nist.gov/>

é importante verificar a relação entre a velocidade do fluido e sua respectiva velocidade do som. Essa relação é dada pelo numero de mach e pode ser calculada pelas Eqs. (1.36) e (1.37) para gases calorificamente perfeitos, e para todos os casos de escoamentos compressíveis, pela Eq. (1.38).

$$a = \sqrt{\gamma R_{gas} T} \quad \left[\frac{m}{s} \right] \quad (1.36)$$

$$M = \frac{u}{a} \quad (1.37)$$

$$a = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s} = \sqrt{\frac{\nu}{\tau_s}} \quad \left[\frac{m}{s} \right] \quad (1.38)$$

Essas equações são capazes de avaliar o escoamento e seus respectivos regimes sônicos, já que é indicado evitar escoamentos em regimes transônicos ou supersônicos para essa aplicação; escoamentos com numero de mach $M > 0,3$ também devem ser evitados, se possível para facilitar os cálculos, já que para $M > 0,3$ o escoamento é considerado compressível (ANDERSON, 2003).

1.4 Combustão

1.4.1 Temperatura Adiabática de Chama

As chamas são classificadas em dois tipos, pré misturadas ou difusas, no primeiro caso, como o próprio nome sugere, o combustível e comburente estão misturados previamente ao momento da combustão. No caso das chamas difusas, o comburente e combustível se encontram separados e a mistura ocorre no local da combustão, câmara de combustão.

O termo difusão se aplica estritamente à difusão molecular dos elementos que compõem as partes. As chamas difusas podem ser do tipo chamas difusas turbulentas ou laminares onde ocorre a mistura das partes, comburente e combustível, em bases macroscópicas (TURNS, 2000).

O gás utilizado como combustível pode e deve ser escolhido a partir de:

1. Capacidade Calorífica.
2. Acessibilidade.
3. Capacidade operacional em relação a pressão e temperatura de armazenamento e operação.

Geralmente a acessibilidade dele no mercado está altamente associada ao terceiro tópico.

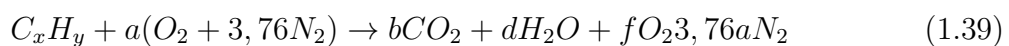
A temperatura adiabática de chama deve ser calculada para toda a faixa de valores das misturas pobres até a estequiométrica, para este tipo de projeto não há interesse nos valores correspondentes das misturas ricas, pois o objetivo é gerar a maior quantidade de calor com menor custo possível, e para este tipo de operação não há problemas relacionados a escassez de comburente como em algumas situações de propulsão aeronáutica ou espacial.

As reações para misturas pobres e estequiométricas se dão para cada hidrocarboneto e o balanceamento pode ser feito pela Eq. (1.39) (TURNES, 2000). Os termos a, b, c, d e f determinados pelas Eqs. (1.40), (1.41), (1.42) e (1.43) em função dos elementos presentes em cada hidrocarboneto e da razão da mistura, permitem calcular o balanceamento da reação de combustão exposta na Eq. (1.39).

Observando com atenção o balanço químico é possível perceber a relação entre os elementos presentes no hidrocarboneto e a formação de dióxido de carbono, água e oxigênio presentes no produto da reação. Como o objetivo está relacionado a aproveitar o calor proveniente de gases acessíveis comercialmente, não cabe a este presente trabalho analisar estas relações, tendo em vista que não seria possível modificar os gases para um projeto que tem como requisito a acessibilidade do combustível no mercado.

As Equações (1.51) e (1.52) se complementam, já que a Eq. (1.51) mostra a igualdade existente entre a entalpia dos produtos e dos reagentes e a Eq. (1.52) mostra os termos que compõem a entalpia de cada molécula. A entalpia de formação é inerente a cada molécula, há dados disponíveis a respeito da entalpia de formação no estado padrão em (NIST,), assim como outras propriedades das moléculas.

A Equação (1.25) é utilizada para calcular o calor específico a pressão constante das moléculas presentes na reação, em função da temperatura, a partir dos coeficientes presentes em (KEE; MULLER, 2000). Como C_p é função da temperatura, é possível calculá-lo para cada incremento de temperatura associado a temperatura final resultante da razão equivalente da mistura; é importante ressaltar que para o cálculo da entalpia dos reagentes não há variação de temperatura e, portanto, seus resultados dependem somente da entalpia de formação de suas respectivas moléculas e suas frações parciais. Isso permite desenvolver o cálculo numérico partindo de uma estimativa inicial de temperatura adiabática de chama (TURNES, 2000).



$$a = \frac{x + \frac{y}{4}}{\Phi} \quad (1.40)$$

$$b = x \quad (1.41)$$

$$d = \frac{y}{2} \quad (1.42)$$

$$f = \left(\frac{1 - \Phi}{\Phi} \right) \left(x + \frac{y}{4} \right) \quad (1.43)$$

A composição do ar assumida para os cálculos estequiométricos será de 21% de O_2 e 79% de N_2 em volume, ou seja para cada mol de O_2 , tem-se 3,76 mols de N_2 (TURNES, 2000).

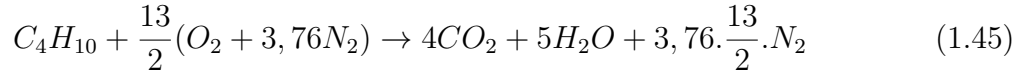
A razão estequiométrica Ar/Combustível será dada por:

$$\left(\frac{A}{F} \right)_{estequiométrica} = \frac{m_{ar}}{m_{combustível\ estequiométrica}} = \frac{4,76a}{1} \frac{MW_{ar}}{MW_{combustível}} \quad (1.44)$$

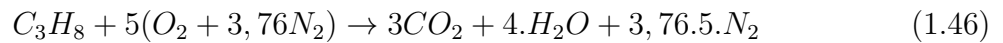
(TURNES, 2000)

As reações de combustão para os respectivos gases da mistura são:

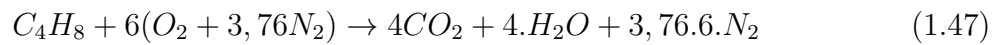
Butano



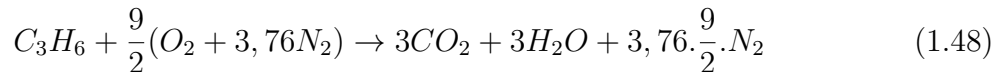
Propano



Buteno



Propeno



Com essas reações, podemos calcular a mistura ar combustível necessária para que a combustão completa de cada molécula ocorra (Razão Estequiométrica de Queima).

A razão equivalente da mistura real é relacionada à razão estequiométrica, ou seja, misturas ricas ou pobres devem partir da razão equivalente, a qual é função da estequiométrica.

$$\Phi = \frac{\frac{M_{combustível}}{M_{comburente}}}{\left[\frac{M_{combustível}}{M_{comburente}} \right]_{est}} = \frac{\left[\frac{M_{comburente}}{M_{combustível}} \right]_{est}}{\frac{M_{comburente}}{M_{combustível}}} \quad (1.49)$$

Tabela 4 – Razões Equivalentes Φ

-	C	H	O	N	=	C	H	O	N	Razão Estequiométrica $\left[\frac{M_{ar}}{M_{combustível}}\right]$
Butano	4	10	13	48.88	=	4	10	13	48.88	15.38
Propano	3	8	10	37.6	=	3	8	10	37.6	15.6
Buteno	4	8	12	45.12	=	4	12	12	45.12	14.7
Propeno	3	6	9	33.84	=	3	6	9	33.84	14.7

A entalpia absoluta de formação é propriedade imprescindível para se efetuar os cálculos de temperatura de chama adiabática. Estas podem ser encontradas em tabelas (KEE; MULLER, 2000).

$$\bar{h}_i(T) = \bar{h}_{f,i}^0(T_{ref}) + \Delta \bar{h}_{s,i}(T_{ref}) \quad (1.50)$$

Onde $\bar{h}_i(T)$ é **entalpia absoluta** ; $\bar{h}_{f,i}^0(T_{ref})$ é a **entalpia de formação** em sistema ar padrão, e outras palavras, é a energia necessária para dissociar as moléculas durante o processo (T_{ref}, P^0) , e $\bar{h}_{s,i}(T_{ref})$ é a entalpia relacionada ao calor sensível. ⁵

$$H_{reagentes} = \sum N_i \bar{h}_i(T) = H_{produtos} = \sum N_i \bar{h}_i(T) \quad (1.51)$$

$$H = \sum N_i [\bar{h}_{f,i}^0 + \bar{C}_{p,i}(T_{ad} - T_{amb})] \quad (1.52)$$

O calculo da temperatura adiabática de chama deve ser realizado a partir de uma temperatura adiabática de chama estimada

1.4.2 Transferência de Calor

A transferência de calor será fundamental para verificar o dimensionamento e delimitar o escopo do projeto, já que a partir das características dos materiais usualmente forjados, das dimensões das peças que se deseja aquecer no forno é possível realizar o dimensionamento da carga de aquecimento necessária para trabalhar os diversos tipos de materiais e peças. Antes de estimar o fluxo mássico preliminar, é preciso saber as perdas do forno em que será utilizado o queimador atmosférico projetado, mesmo que seja uma estimativa, é possível chegar a boas aproximações a partir da estimativa de um forno para a devida aplicação.

O campo de estudos da transferência de calor e massa envolve características de escoamento e características do material em função do tipo de fenômeno envolvido na transferência de calor. O objeto de estudo deste trabalho é o desenvolvimento de um

⁵ Para melhor visualização do significado desta soma, que representa a entalpia absoluta, basta observar a Fig. 2.6 da referencia (TURNS, 2000).

queimador atmosférico com controle de temperatura de chama, todavia é importante fazer uma análise, mesmo que de maneira bem aproximada, das perdas de calor de um forno com dimensões típicas utilizadas nos processos de forjamento em cutelarias.

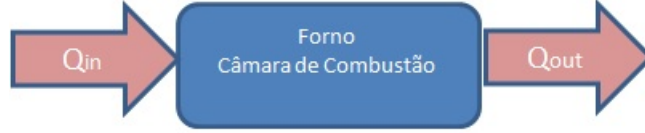


Figura 13 – Camara de Combustão - Q_{in} - Q_{out}

Fundamentado pela lei da conservação das massas e da energia de um sistema, é possível iniciar o dimensionamento de todo o sistema baseado nas perdas de calor existentes e inerentes dos processos.

A transferência de calor e resistência térmica em paredes com camadas múltiplas pode ser calculada pelas Eqs. (1.53) e (1.54).

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R_{total}} \quad (1.53)$$

$$R_{total} = R_{convecção,1} + R_{parede,1} + R_{parede,2} + R_{convecção,2} \quad R_{total} = \frac{1}{h_1 A} + \frac{L_1}{k_1 A} + \frac{L_2}{k_2 A} + \frac{1}{h_2 A} \quad (1.54)$$

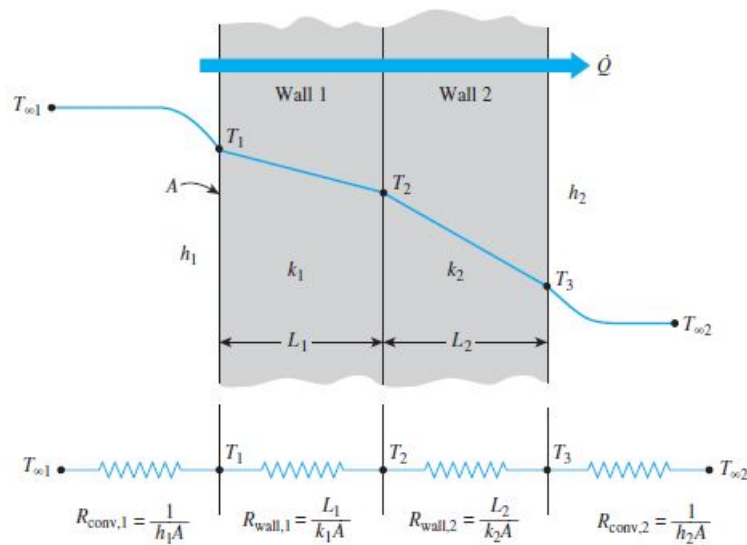


Figura 14 – Resistência Térmica através de Parede Multicamadas (CENGEL, 2015a)

1.4.3 Fluxo Mássico

O Fluxo mássico é um dos parâmetro mais importantes para se iniciar o dimensionamento do queimador, e podemos deixar o fluxo mássico da entrada de ar (comburente) em função do fluxo mássico do combustível. Há diferenças entre os cálculos efetuados para o fluxo mássico em queimadores os quais operam com velocidade na saída subsônica, transônica ou sônica.

As razões equivalente e estequiométrica são dadas pela relação entre as massas de combustível e comburente. O fluxo mássico possibilita trabalharmos a razão da mistura em função da área do bocal e garganta e pressão de operação.

$$\frac{M_{comburente}}{M_{combustível}} = \frac{[\frac{M_{comburente}}{M_{combustível}}]_{est}}{\phi} \quad (1.55)$$

$$\dot{m}_{comburente} = \frac{\dot{m}_{combustível} [\frac{M_{comburente}}{M_{combustível}}]_{est}}{\phi} \quad (1.56)$$

([TURNS, 2000](#))

Para o dimensionamento do fluxo mássico, deve-se primeiro estimar qual a taxa de calor entregue na câmara de combustão para compensar as perdas e conseguir manter a temperatura necessária para que a atividade fim (forjamento) não seja prejudicada.

$$\dot{Q}_{chama} = \dot{m}_{mistura} cp_{mistura} \Delta T \quad (1.57)$$

onde $\Delta T = T_{chama} - T_{mistura}$ e o fluxo mássico é dado por:

$$\dot{m}_{mistura} = \frac{\dot{Q}_{chama}}{cp_{mistura} \Delta T} \quad (1.58)$$

sendo que deve-se atender a seguinte condição $\dot{Q}_{chama} \geq \dot{Q}_{perdas}$

O fluxo mássico total injetado na câmara de combustão (forno) é o somatório do fluxo mássico primário e secundário e as velocidades desses respectivos escoamentos podem ser calculadas pelas Eqs. (1.17) e (1.22).

A velocidade do fluxo mássico final na região 5 do esquemático apresentado na Fig. (15) é dada pela Eq. (1.60).

$$\dot{m}_{final} = (\dot{m}_{gas} + \dot{m}_{ar}) \quad (1.59)$$

$$\begin{aligned} \rho_{final} \cdot A_{c.mist} \cdot u_{final} &= \rho_{ar} \cdot (A_{c.mist} - A_{orificio}) \cdot u_{ar} + \rho_{gás} \cdot A_{orificio} \cdot u_{gás} \\ u_{final} &= \frac{\rho_{ar} \cdot (A_{c.mist} - A_{orificio}) \cdot u_{ar} + \rho_{gás} \cdot A_{orificio} \cdot u_{gás}}{\rho_{final} \cdot A_{c.mist}} \end{aligned} \quad (1.60)$$

2 Metodologia

2.1 Projeto

A metodologia para execução do projeto e dimensionamento do queimador atmosférico deve passar por algumas etapas:

- Analisar compressibilidade do gás. É desejável que as pressões de operação trabalhem no regime incompressível.

Fator Compressibilidade - Diagrama Generalizado de Compressibilidade de Nelson Obert (Fig. 12).

Numero de Mach (Eqs. 1.36, 1.37).

- Calcular velocidade do fluido, combustível na saída do bico (orifício) em função da pressão de operação controlada pelo regulador de pressão.¹
- Dimensionar bocal em função da velocidade primária (gás) (razão entre áreas do bocal e garganta). Nesta etapa do projeto, os gráficos de temperatura por mistura e abertura devem ser analisados para determinar os limite de temperatura mínimo e máximo do queimador.
- Dimensionar área de abertura para ar atmosférico aspirado referente a velocidade secundária gerada pelo Efeito Venturi. A variação da abertura será responsável pela regulagem da mistura e consequentemente temperatura adiabática da chama. Portanto, nesta etapa os gráficos de temperatura por abertura devem ser analisados para determinar a controlabilidade de temperatura do queimador.
- Calcular o tempo de consumo para o cilindro utilizado e checar o fluxo mássico de saída em relação à capacidade de vaporização máxima do gás GLP para o determinado cilindro (NBR 13523) (i) $P13 = 0.6 \frac{kg}{h}$, (i) $P45 = 1 \frac{kg}{h}$.²

O principal objetivo ao longo do desenvolvimento deste queimador atmosférico é controlar a temperatura adiabática de chama, consequentemente controlar a Razão Equivalente da Mistura Φ .

Para facilitar a visualização do funcionamento do sistema particionou-se o sistema em regiões na Fig. (15), de acordo com as alterações sofridas no escoamento em cada

¹ Caso não seja possível fabricar um bico de acordo com os modelos da Fig. (4) (BERRY I. V. BRUMBAUGH, September, 1921), é possível encontrar alternativas bastante utilizadas para esta aplicação, como bicos de gicleur ou bicos para solda MIG.

² IPEM - Instituto de Pesos e Medidas do Estado de São Paulo, acessado em 27/05/2019

estágio da operação do queimador atmosférico. O fluxo mássico primário (GLP) é forçado pelo duto de condução do gás combustível escoando através de um orifício posicionado em 3, na entrada da câmara de mistura [região representada entre 3 e 4 na Fig. (15)]. O gás é injetado com velocidade controlada pelo regulador de pressão diretamente na região da garganta gerando uma diferença de pressão entre as regiões 3 e 2 ($P_2 = P_0$) que é equivalente à pressão atmosférica, forçando então o ar atmosférico entrar pelo *Princípio de Venturi* (ANDERSON, 2011). O bocal transforma a energia interna do fluido em energia cinética, assim como o difusor no final do queimador (entre região 4 e 5) respeitando o princípio da conservação de energia, transforma a energia cinética em energia interna aumentando a pressão e diminuindo a velocidade.

Ao longo da câmara de mistura entre as regiões 3 e 4, o combustível se mistura ao comburente (oxidante) caracterizando a chama produzida pelo queimador como pré misturada. Um fator importante, que não é objeto de estudo deste presente trabalho, é a qualidade da mistura proporcionada no momento da combustão na região 5. A qualidade dessa mistura pode ser alterada de acordo com a geometria, rugosidade do material da câmara de mistura ou pela presença de *geradores de vortex* responsáveis por alterar as condições da camada limite entre o escoamento e superfície interna da câmara de mistura, podendo gerar turbulências desejadas para se obter misturas mais homogêneas.

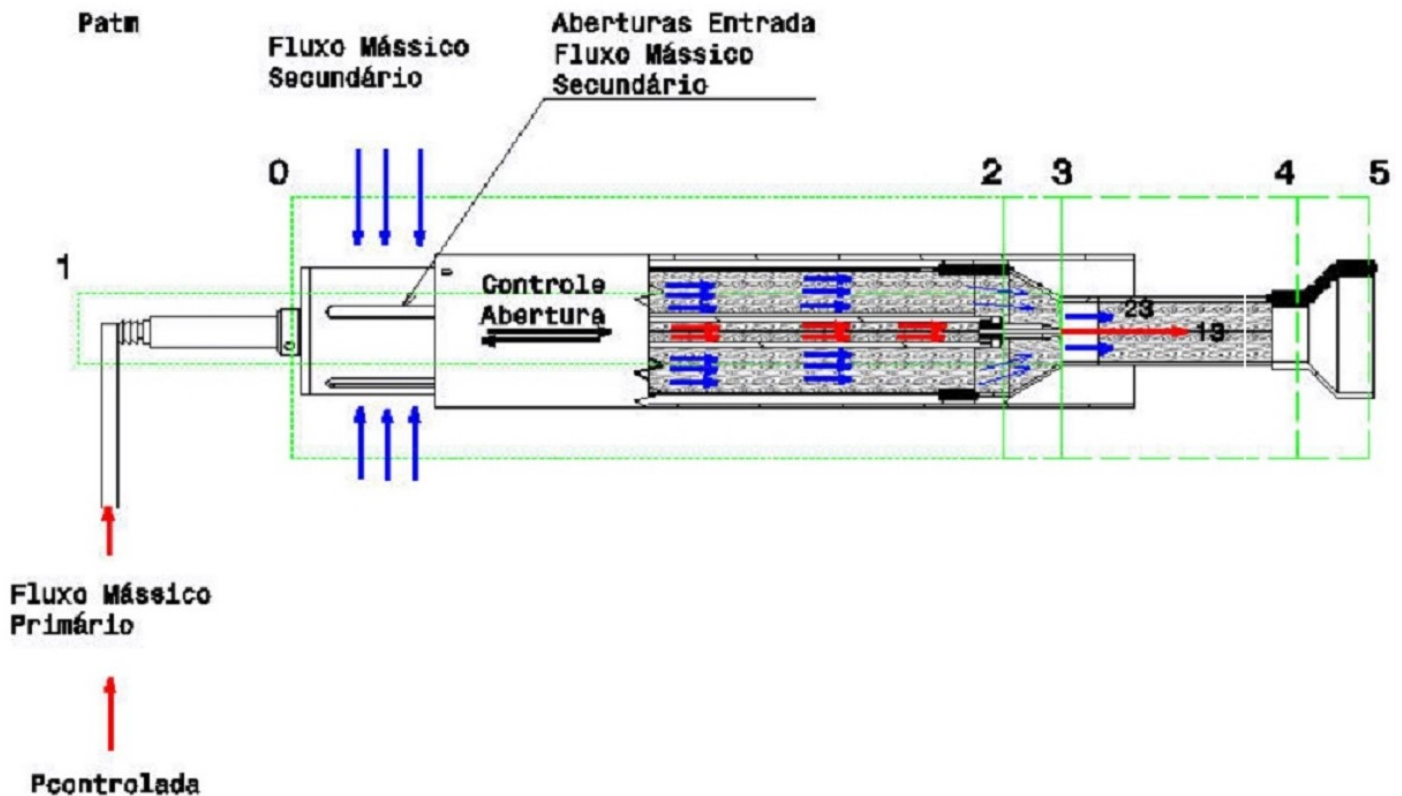


Figura 15 – Esquemático - Queimador Atmosférico

A análise da compressibilidade foi realizada até 100 KPa com variação de 5 KPa, todavia para otimizar o tempo das análises presentes nas seções seguintes, limitou-se a pressão operacional limite para 25 KPa³. Como pode ser observado na Tab. (5), a pressão de 25KPa o numero de mach ultrapassou significativamente o limite utilizado para escoamentos incompressível de 0,3 atingindo valores de 0,62 aproximando-se também da região de escoamento transônico que inicia-se a 0,8 mach e pode haver o início da formação de ondas de choques.

2.1.1 Análise Compressibilidade

Em uma análise preliminar, o projetista pode acabar ignorando as limitações do mercado de reguladores de pressão e escolher faixas e variações de operação de pressão muito pequenas. Para evitar retrabalho, aconselha-se observar os modelos de regulador de pressão e suas características de regulação antes de estipular os limites de operação. A pressão reduzida das moléculas que compõem a mistura do GLP foi calculada para diversas pressões de operação, de forma que pode-se comparar com o diagrama generalizado de compressibilidade (Fig. 12) e observar que para as pressões manométricas de operação que variam de 0[Pa] a 100[KPa], a pressões reduzidas resultantes não ultrapassam 0,048902 como pode ser observado na Tab. (5). A Temperatura Reduzida pode ser calculada a partir das Temperaturas Críticas presentes na Tab. (3).

A temperatura do gás é alterada em função da pressão de armazenamento, e consequentemente modificada ao longo da operação considerando cilindros comuns sem controle de pressurização. Os cilindros comercializados nacionalmente possuem pressão interna de 3 a 10 $\left[\frac{kgf}{cm^2}\right]$ ⁴ o que nos permite calcular temperaturas reduzidas entre aproximadamente 0,6 e 0,7 segundo as pressões de armazenamento reais praticadas.

O calculo da temperatura reduzida do gás deve ser feito a partir da temperatura dos gases em suas respectivas pressões de operação. Para as temperaturas equivalentes as pressões de armazenamento a temperatura reduzida varia entre 0,623 e 0,675, o que nos permite obter o fator de compressibilidade do gás pelo diagrama apresentado na Fig. (12).

Para efeitos práticos, se utilizado apropriadamente um regulador de pressão, pode-se desconsiderar o fator de compressibilidade associado ao armazenamento desde que respeitado o limite de vazão do cilindro.

A análise do regime de operação a vazante do regulador de pressão foi feita sob

³ O tempo de análise computacional para faixas de pressão variando até 25 KPa para cada modelo proposto é de cerca de 4min30s enquanto para 100KPa demanda cerca de 26 minutos. Vale ressaltar que o programa não foi otimizado para aumentar a eficiência dos cálculos e utilização de memória, portanto há possibilidades de aumentar a eficiência do programa e realizar cálculos numéricos para uma faixa maior de pressão com menor demanda de tempo.

⁴ <https://www.liquigas.com.br> , acessado em 23/05/2019

a teoria do fator de compressibilidade com Diagrama Generalizado e para escoamentos incompressível com número de mach menor o igual a 0,3.

A pressão reduzida em função da pressão de operação dos gases presentes na mistura pode ser observada na Fig. (16) e também na Tab. (5) junto aos números de mach referentes a velocidade de saída do gás GLP na região 3 da Fig. (15).

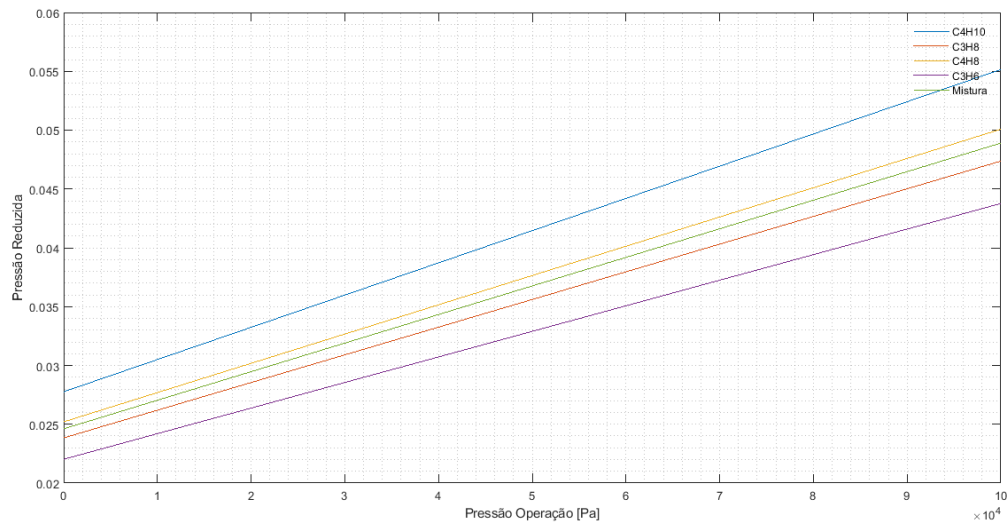


Figura 16 – Pressão Operação x Pressão Reduzida

2.1.2 Temperatura de Chama Adiabática - GLP

O procedimento numérico utilizado para o cálculo das temperaturas adiabáticas de chama para cada respectiva razão equivalente necessita de uma estimativa de temperatura adiabática de chama inicial, já que esta não é conhecida, e a partir dos resultados obtidos é possível fazer nova estimativa. O método utilizado para calcular a temperatura adiabática de chama para misturas pobres, baseado em (TURNS, 2000), consiste em estimar uma temperatura inicial e calcular ; no algoritmo criado a estimativa inicial utilizada foi a temperatura de 2100[K]. O resultado encontrado deve compor a média aritmética que será calculada entre a estimativa inicial e o resultado encontrada na iteração passada, para que possam ser realizados os cálculos para a próxima iteração. Os resultados obtidos para temperatura de chama adiabática convergem com precisão da ordem de 4 casas decimais com cerca de 5 a 6 iterações (dependendo da razão da mistura). Para garantir a convergência de resultados para todas as misturas, o cálculo numérico para todas as misturas foi efetuado com 10 iterações.

As Figuras (17) e (18) mostram os resultados para a temperatura adiabática de chama referentes ao GLP, na Fig. (17) observa-se que as temperaturas obtidas para cada um dos hidrocarbonetos tem pequeno desvio relativo. Devido a energia liberada por cada uma das moléculas presentes na mistura estar associada a sua quantidade de massa, e

Tabela 5 – Dados para Análise de Compressibilidade

Pressao Manométrica [Pa]	Pressão Absoluta [Pa]	Pressão Reduzida	Mach
5000	106325	0,025827	0,2918
10000	111325	0,027041	0,4078
15000	116325	0,028256	0,4937
20000	121325	0,02947	0,5639
25000	126325	0,030685	0,6237
30000	131325	0,031899	0,6763
35000	136325	0,033114	0,7232
40000	141325	0,034328	0,7657
45000	146325	0,035543	0,8045
50000	151325	0,036757	0,8403
55000	156325	0,037972	0,8736
60000	161325	0,039186	0,9046
65000	166325	0,040401	0,9336
70000	171325	0,041615	0,9610
75000	176325	0,04283	0,9868
80000	181325	0,044044	1,0112
85000	186325	0,045259	1,0344
90000	191325	0,046473	1,0565
95000	196325	0,047699	1,0776
100000	201325	0,048902	1,0977

fundamentado pela primeira lei da termodinâmica (conservação da energia) ([CENGEL, 2015b](#)), é possível fazer uma aproximação da temperatura adiabática de chama do GLP. A partir da média ponderada das temperaturas encontradas para cada hidrocarboneto presente na mistura obtém-se o valor da temperatura de chama adiabática da mistura que compõe o GLP. Outra forma de calcular as temperaturas adiabáticas de chama para misturas de hidrocarbonetos estão descritas em ([TURNS, 2000](#)).

O procedimento se dá de modo iterativo, já que não se sabe a temperatura de chama adiabática, estima-se um valor inicial para calcular C_p e então encontra-se um novo valor para T_{ad} ; o valor convergirá para o valor da temperatura adiabática de chama em poucas iterações (no programa criado, o valor converge com precisão maior que 4 casa decimais para 6 iterações).

Com esses valores, pode-se delimitar o escopo do projeto, baseado nos valores de operação para forjamento presentes na Tab. (1).

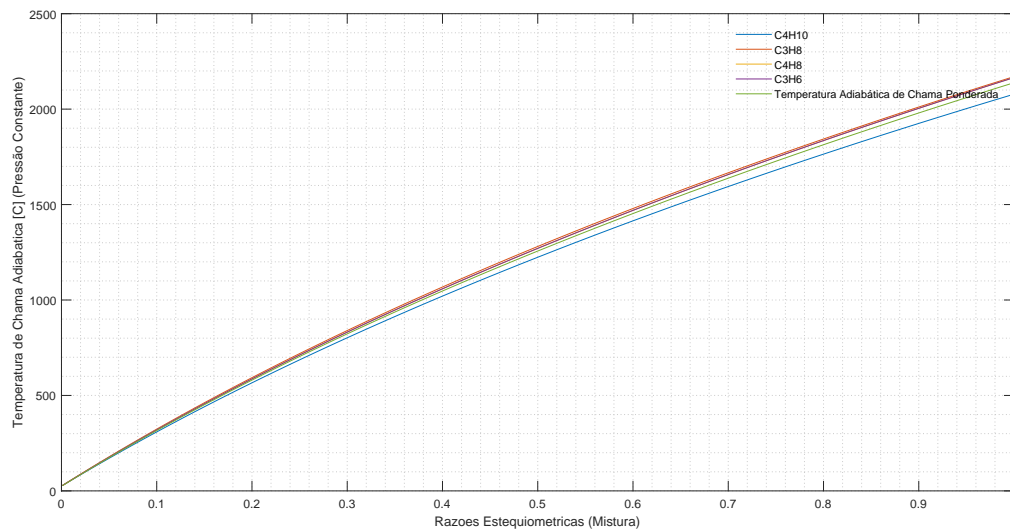


Figura 17 – Temperaturas Adiabáticas de Chama - Hidrocarbonetos

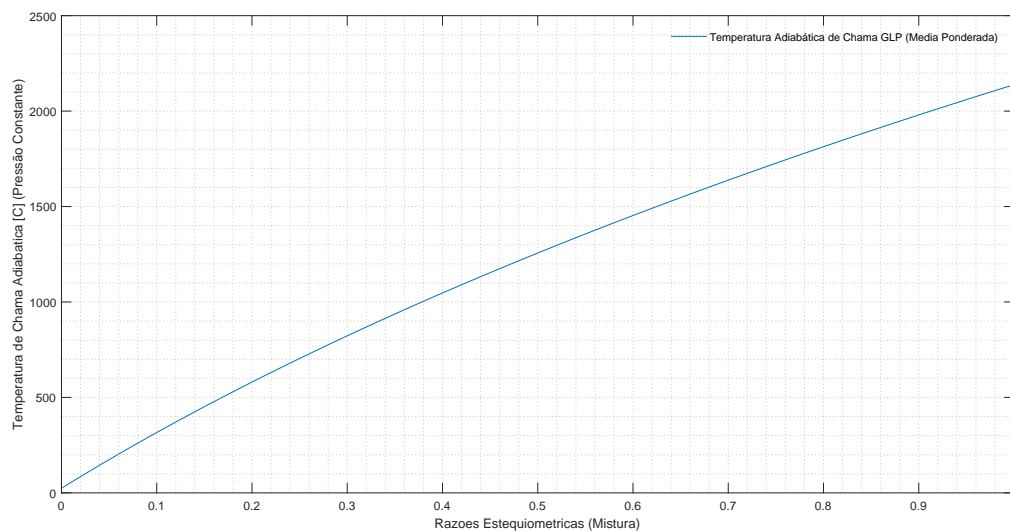


Figura 18 – Temperatura Adiabáticas de Chama

2.1.3 Velocidade de Saída Gás Combustível - Fluxo Mássico Primário

A velocidade de saída do gás combustível é controlada pelo regulador de pressão instalado a vazante do orifício de saída, de acordo com a Eq. (1.17). Assim sendo o controle da pressão de operação é importante para garantir que:

- (i) A velocidade na saída do orifício seja constante e não sofra variações ao longo da operação devido a queda de pressão interna no cilindro de gás,
- (ii) O controle da quantidade de calor final produzida pelo queimador atmosférico projetado seja respeitado,

- (iii) Evitar operações que excedam o limite de vazão dos cilindros².

2.1.3.1 Quantidade de Calor Gerado

A quantidade de calor gerada sofre influência do fluxo mássico primário e secundário e temperatura adiabática de chama. A Figura (19) permite observar que o fluxo mássico primário, regulado pela pressão de operação, tem maior influência sobre a quantidade de calor final produzida em relação ao controle da mistura dado pela variação da abertura da entrada de ar atmosférico.

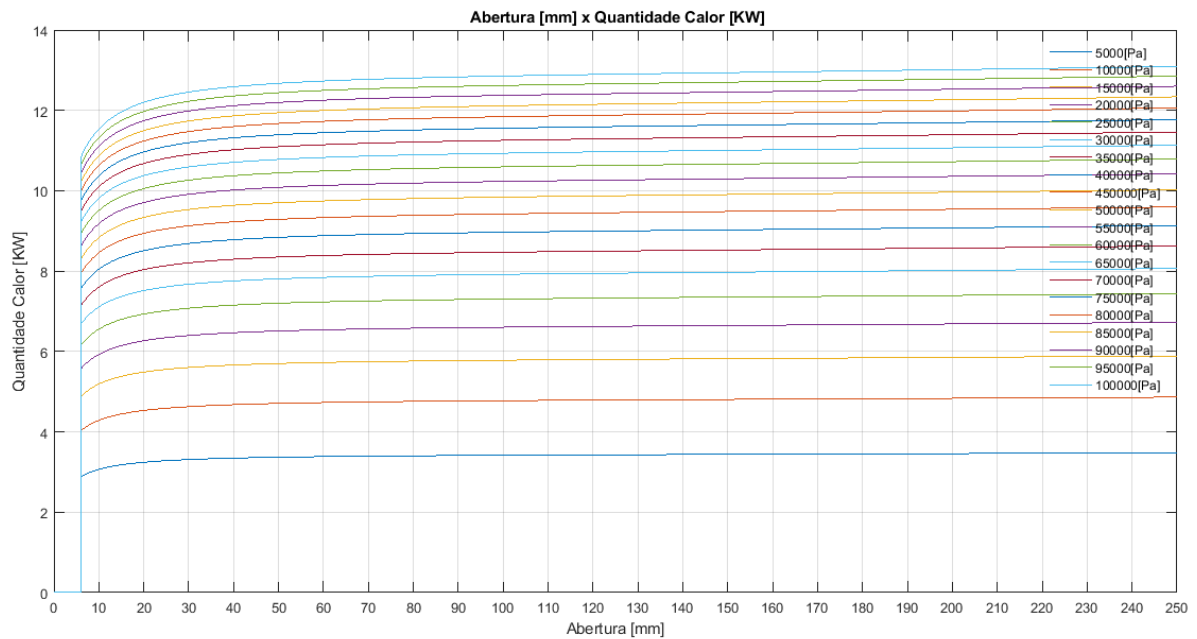


Figura 19 – Tempo de Consumo e Fluxo Mássico em função da Pressão de Operação
Orifício = 0,8mm , Bocal = 0,3 , Abertura = 9mm

2.1.3.2 Tempo de Consumo e Fluxo Mássico Limite de Operação

O tempo de consumo e o fluxo mássico primário estão associados exclusivamente ao controle da pressão de operação, consequentemente velocidade de saída do gás. A Figura (20) mostra o tempo de consumo para um cilindro comercial P13.

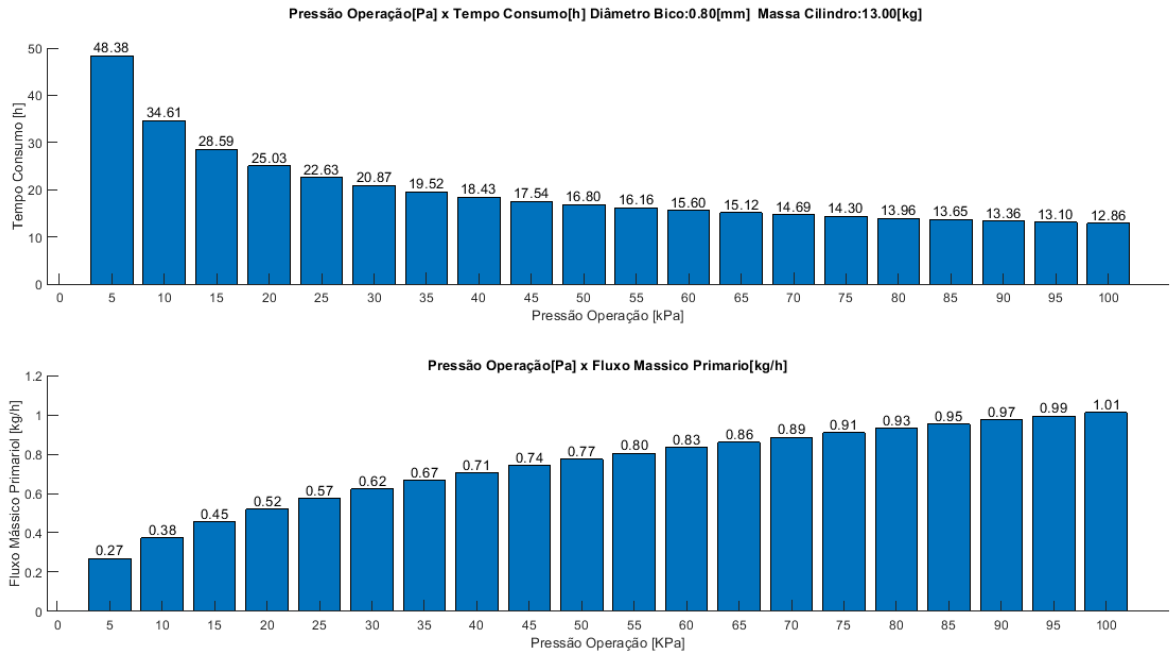


Figura 20 – Tempo de Consumo e Fluxo Mássico em função da Pressão de Operação
Orifício = 0,8mm , Bocal = 0,3 , Abertura = 9mm

2.1.4 Controle da mistura

O controle da mistura é dado pelo controle da quantidade de ar aspirado em relação a quantidade de gás injetado. O cilindro regulador e a razão do bocal são as partes que compõem o queimador responsáveis pelo controle da mistura (Razão Equivalente) e consequentemente da temperatura de chama.

2.1.4.1 Abertura

A abertura do cilindro de aspiração é responsável por controlar o fluxo mássico secundário de entrada, pela Eq. (2.1) percebemos que é possível modificar o fluxo mássico alterando a área ou velocidade. A maneira que possuímos para alterar a velocidade do fluxo mássico esta relacionada ao bocal, todavia a velocidade do fluxo secundário u_{ar} é proporcional a velocidade do fluxo mássico primário u_{gas} independente da razão entre áreas do bocal projetado. Portanto para o controlar a razão equivalente da mistura, consequentemente da temperatura, não importa o dimensionamento do bocal e sim a variação da abertura de entrada do ar atmosférico.

$$\dot{m} \left[\frac{kg}{s} \right] = \rho \left[\frac{kg}{m^3} \right] A [m^2] u \left[\frac{m}{s} \right] \quad (2.1)$$

No desenho mecânico do cilindro de aspiração, seção (3.2.2), é fácil observar o que o projetista deve mudar para alterar a razão equivalente da mistura Φ . O conjunto que forma o sistema de controle da mistura é composto pelo cilindro de aspiração e cilindro

Tabela 6 – Características segundo Abertura do Cilindro Aspirador
Razão Bocal = 0,3 ; Orifício = 0,8mm ; Comprimento Total = 250mm

Abertura			Razão Equivalente	Temperatura [°C]		Controlabilidade		
Modelo	Rasgo Total	3 Rasgos de	$\Phi_{\text{máx}}$	Mínima	Máxima	Ruim	Média	Boa
11	3mm	1mm	>1	672,82	2702,34	$1371,37^{\circ}\text{C} < T$	$1083,93^{\circ}\text{C} < T < 1371,37^{\circ}\text{C}$	$T < 1083,93^{\circ}\text{C}$
12	6mm	2mm	0,68411	622,67	2176,37	$1130,98^{\circ}\text{C} < T$	$939,95^{\circ}\text{C} < T < 1130,98^{\circ}\text{C}$	$T < 939,95^{\circ}\text{C}$
13	9mm	3mm	0,45607	605,56	1727,48	$1015,73^{\circ}\text{C} < T$	$864,92^{\circ}\text{C} < T < 1015,72^{\circ}\text{C}$	$T < 864,92^{\circ}\text{C}$
14	12mm	4mm	0,34205	596,96	1477,21	$950,72^{\circ}\text{C} < T$	$829,85^{\circ}\text{C} < T < 950,72^{\circ}\text{C}$	$T < 829,85^{\circ}\text{C}$
15	15mm	5mm	0,27364	591,76	1316,86	$920,14^{\circ}\text{C} < T$	$798,242^{\circ}\text{C} < T < 920,14^{\circ}\text{C}$	$T < 798,242^{\circ}\text{C}$
16	30mm	10mm	0,12703	580,67	941,5064	$802,87^{\circ}\text{C} < T$	$718,22^{\circ}\text{C} < T < 802,87^{\circ}\text{C}$	$T < 718,23^{\circ}\text{C}$
17	60mm	20mm	0,068411	576,21	776,71	N/A	$677,53^{\circ}\text{C} < T < 776,36^{\circ}\text{C}$	$T < 677,53^{\circ}\text{C}$
18	90mm	30mm	0,045607	574,47	709,86	N/A	$656,56^{\circ}\text{C} < T < 709,86^{\circ}\text{C}$	$T < 656,56^{\circ}\text{C}$

de regulação. O dimensionamento do primeiro resulta na capacidade que o queimador tem de atingir determinados limites de temperatura e também na controlabilidade da temperatura. O segundo é responsável por variar a área total aberta para entrada do ar atmosférico. Em suma, o principal fator de influência é a largura total dos rasgos, já que quanto menor, maior será a controlabilidade das razões equivalentes próximas da razão estequiométrica e consequentemente maior a temperatura de chama adiabática com controlabilidade razoável alcançada.

Os modelos apresentados na Tab. (6) variam a largura total equivalente a soma das larguras dos três rasgos, que tem comprimento fixo de 250 milímetros, e podem ser observados no desenho mecânico do cilindro de aspiração. A razão do bocal foi fixada em 0,3.

Os parâmetros qualitativos de controlabilidade foram definidos por critérios de manuseabilidade do cilindro controlador que irá deslizar sobre o cilindro aspirador. Portanto, definiu-se que um operador teria a capacidade de variar a posição do cilindro regulador em um padrão de variação de 2mm. Assim sendo, o padrão qualitativo se dá por:

- (i) **Controlabilidade Ruim** : variações de temperatura maiores que 50°C para cada 2mm deslizado.
 $50^{\circ}\text{C} < T$
- (ii) **Controlabilidade Média** : variações de temperatura entre 20°C e 50°C para cada 2mm deslizado. $20^{\circ}\text{C} < T < 50^{\circ}\text{C}$
- (iii) **Controlabilidade Boa** : variações de temperatura menores que 50°C para cada 2mm deslizado.
 $T < 20^{\circ}\text{C}$

As Figuras (21),(22),(23),(24) e (25) estão apresentadas em sequência, para que fique mais fácil a visualização do comportamento da curva que representa a temperatura em relação a abertura ao longo de cada modelo.

A inclinação da curva descreve a controlabilidade do queimador a medida que o cilindro regulador é aberto ou fechado. Percebe-se que do modelo 11 ao modelo 18 (sequência em que a dimensão da abertura é aumentada) as temperaturas limites diminuem e as faixas de boa e média controlabilidade consequentemente atendem uma faixa menor de temperaturas, além de corresponderem a temperaturas mais baixas.

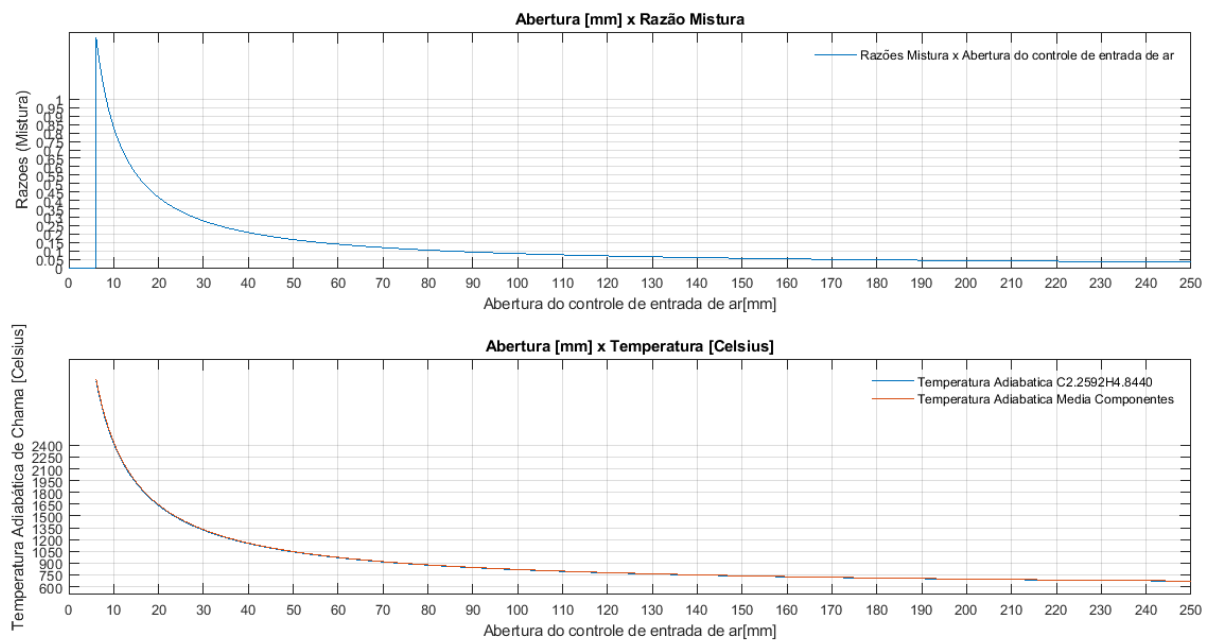


Figura 21 – Tempo de Consumo e Fluxo Mássico em função da Pressão de Operação
Modelo 11 - Orifício = 0,8mm , Bocal = 0,3 , Abertura = 3mm

Portanto cabe ao projetista avaliar e escolher segundo as limitações inerentes ao processo de fabricação, associadas ao escopo do projeto, quais serão as dimensões dos rasgos para entrada de ar e respectiva controlabilidade da temperatura resultante do queimador.

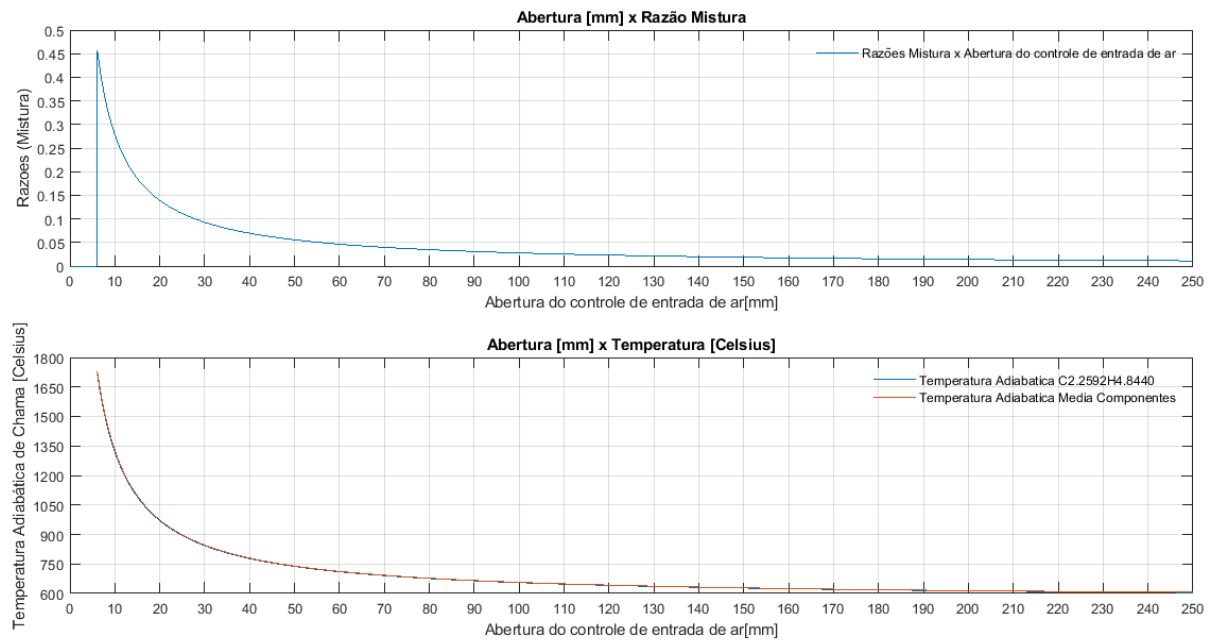


Figura 22 – Tempo de Consumo e Fluxo Mássico em função da Pressão de Operação
Modelo 13 - Orifício = 0,8mm , Bocal = 0,3 , Abertura = 9mm

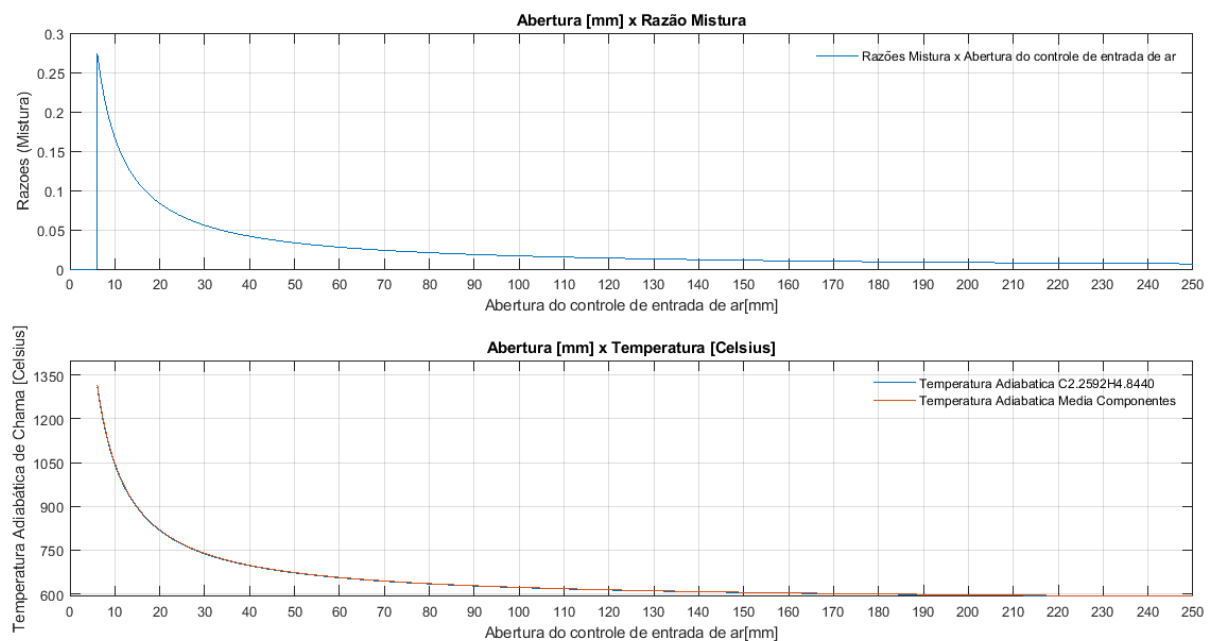


Figura 23 – Tempo de Consumo e Fluxo Mássico em função da Pressão de Operação
Modelo 15 - Orifício = 0,8mm , Bocal = 0,3 , Abertura = 15mm

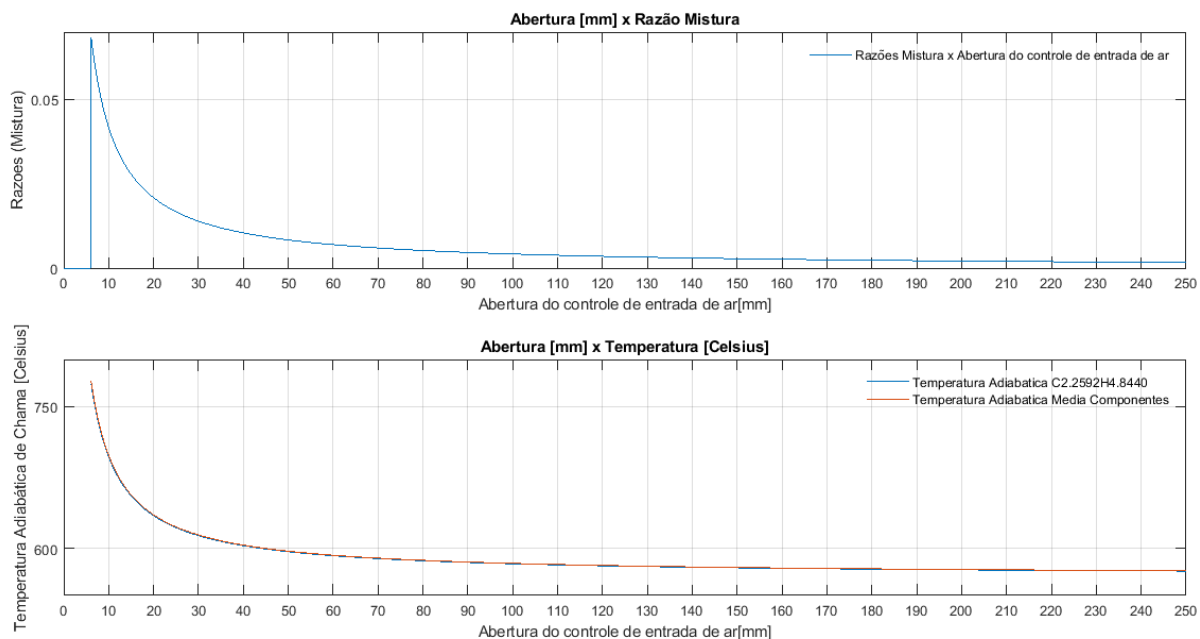


Figura 24 – Tempo de Consumo e Fluxo Mássico em função da Pressão de Operação
Modelo 17 - Orifício = 0,8mm , Bocal = 0,3 , Abertura = 60mm

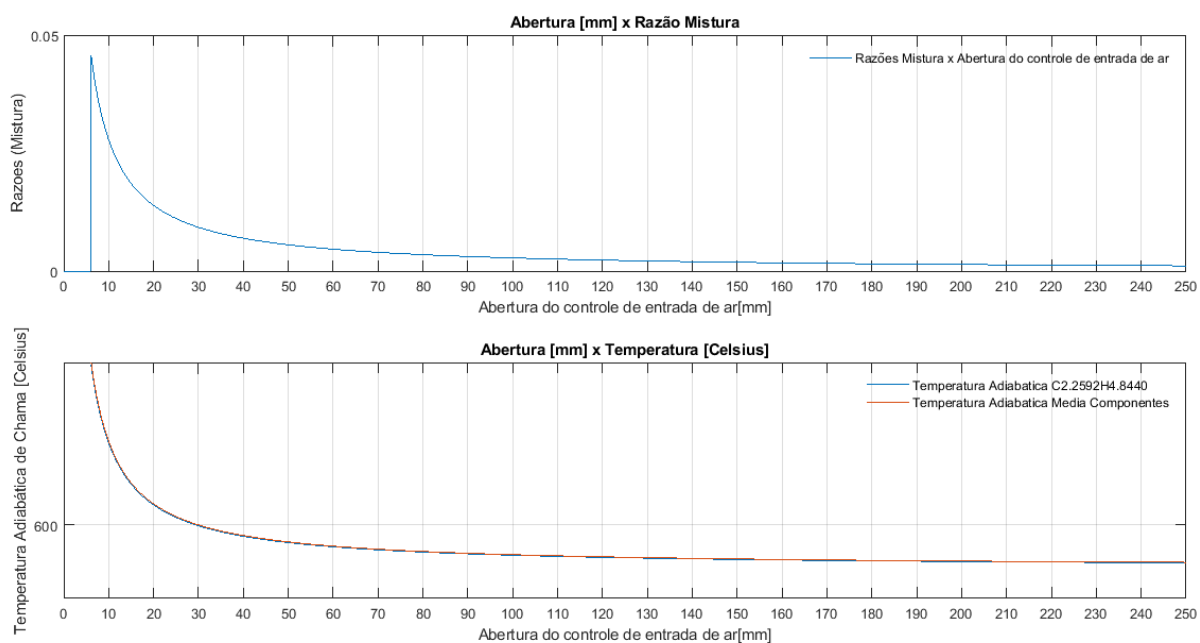


Figura 25 – Tempo de Consumo e Fluxo Mássico em função da Pressão de Operação
Modelo 18 - Orifício = 0,8mm , Bocal = 0,3 , Abertura = 90mm

2.1.4.2 Bocal

O principal efeito causado pela alteração da razão do bocal é o aumento da velocidade do ar atmosférico em função da velocidade de saída do gás controlado pelo regulador de pressão. A metodologia de análise foi baseada em variar as razões do bocal e manter a abertura total (soma da largura dos rasgos) fixada em 9mm.

A partir da Tab. (7) é possível observar que o bocal exerce influência sobre o potencial do queimador atmosférico em atingir seus limites inferiores e superiores de temperatura, e assim como a dimensão da abertura para entrada de ar apresentada na Tab. (6) exerce influência sobre a controlabilidade da temperatura adiabática de chama.

Outro fator importante ao longo do dimensionamento do bocal do queimador atmosférico é observar a velocidade final da mistura, já que para razões equivalentes baixas (temperaturas adiabáticas de chama baixas) a quantidade de ar é relativamente grande em relação a quantidade de gás. Na prática isso exercerá forte influência na velocidade final da mistura já que a quantidade de massa associada ao fluxo mássico de ar será consideravelmente maior que a quantidade de massa referente ao fluxo mássico de gás. Segundo a Eq. (1.60), é possível perceber a relação entre as quantidades de movimento referente a cada escoamento e a velocidade final da mistura.

Tabela 7 – Características segundo Razão do Bocal

Abertura Total = 9mm ; Orifício = 0,8mm ; Comprimento Total = 250mm

Bocal		Razão Equivalente	Temperatura [°C]		Controlabilidade		
Modelo	Razao	$\Phi_{máx}$	Mínima	Máxima	Ruim	Média	Boa
21	0,1	>1	673,35	2721,13	1327,81°C <T	1130,98°C <T <1327,81°C	T <1130,98°C
22	0,15	0,91214	639,67	2571,68	1214,56°C <T	994,00°C <T <1214,56°C	T <994,00°C
23	0,20	0,68411	622,67	2176,37	1156,30°C <T	929,77°C <T <1156,30°C	T <929,77°C
24	0,25	0,54728	612,41	1914,50	1096,88°C <T	898,17°C <T <1096,88°C	T <898,17°C
25	0,3	0,45366	605,56	1727,48	1015,73°C <T	864,92°C <T <1015,73°C	T <864,92°C
26	0,5	0,27364	591,78	1316,86	920,14°C <T	798,24°C <T <920,14 °C	T <798,24°C
27	0,8	0,17102	584,01	1059,23	878,81°C <T	746,27°C <T <878,81°C	T <746,27°C
28	0,99	0,1382	581,52	971,8741	822,36°C <T	730,80°C <T <822,36°C	T <730,80°C

As Figuras (26),(27),(28),(29) e (30) permitem observar que a razão do bocal pode limitar consideravelmente o limite de temperatura atingível pelo queimador. Este fator tem relação direta com a velocidade do fluxo mássico secundário em função da velocidade do fluxo mássico primário.

As figuras (26) e (64) mostram um caso particular em que a razão equivalente alcançada pelo queimador atmosférico é superior a 1, ou seja, mistura rica. A metodologia utilizada para cálculo de temperatura adiabática de chama é válida somente para misturas pobres, portanto os valores de temperatura equivalentes a faixa de razão equivalente que ultrapassa 1, não devem ser considerados.

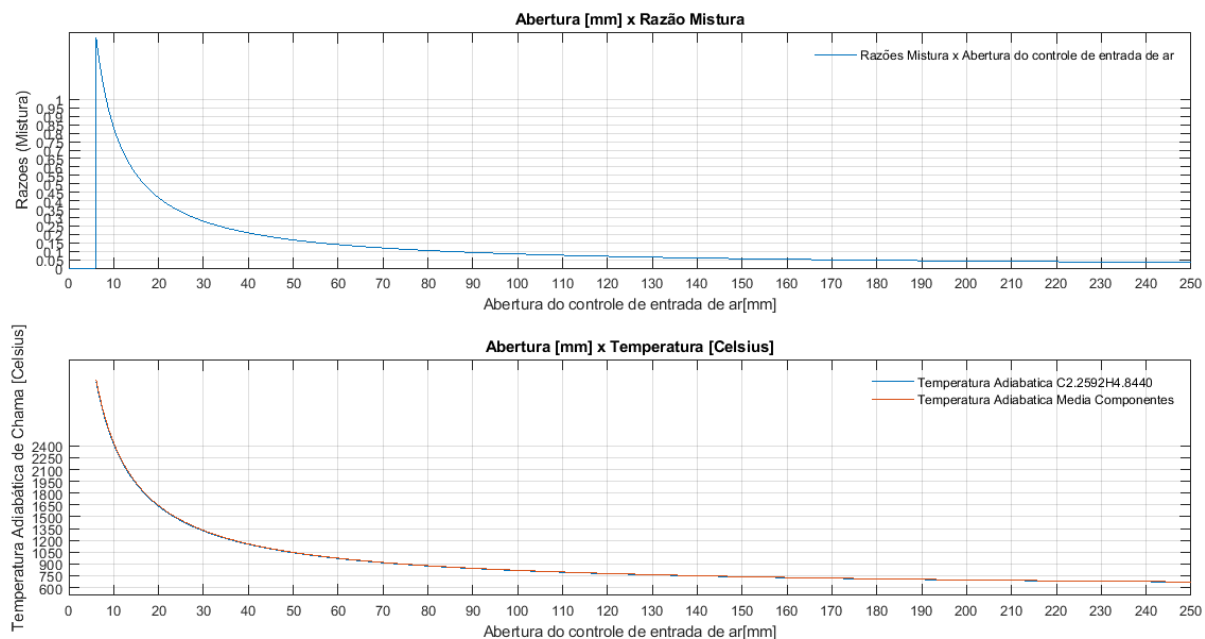


Figura 26 – Tempo de Consumo e Fluxo Mássico em função da Pressão de Operação
Modelo 21 - Orifício = 0,8mm , Bocal = 0,1 , Abertura = 9mm

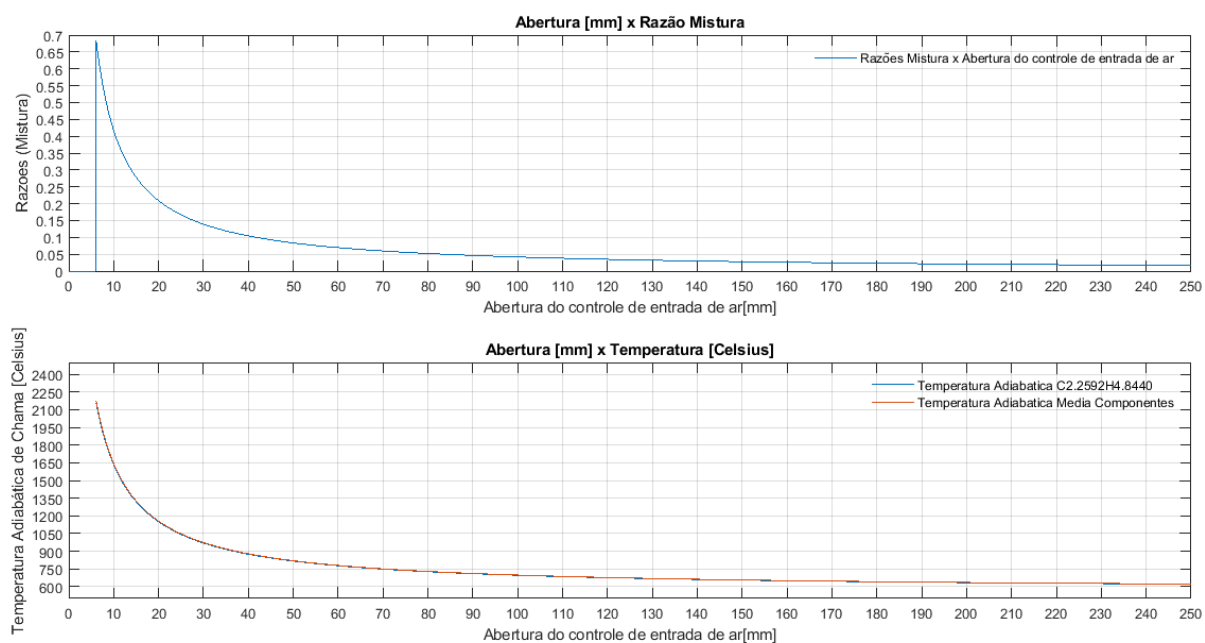


Figura 27 – Tempo de Consumo e Fluxo Mássico em função da Pressão de Operação
Modelo 23 - Orifício = 0,8mm , Bocal = 0,2 , Abertura = 9mm

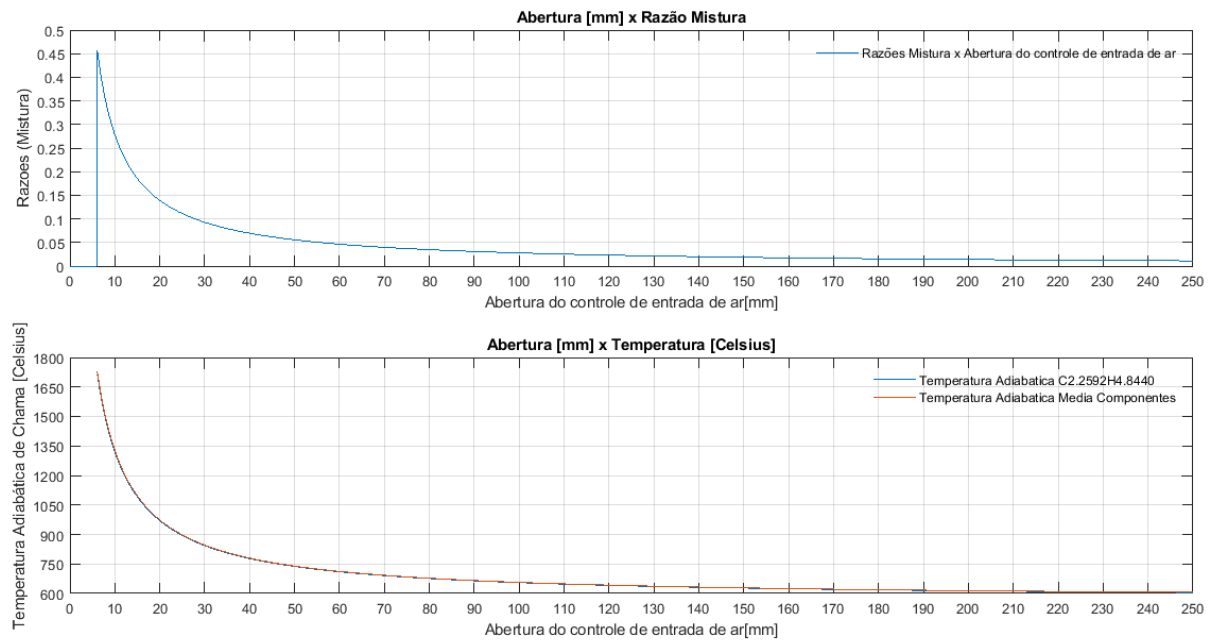


Figura 28 – Tempo de Consumo e Fluxo Mássico em função da Pressão de Operação
Modelo 25 - Orifício = 0,8mm , Bocal = 0,3 , Abertura = 9mm

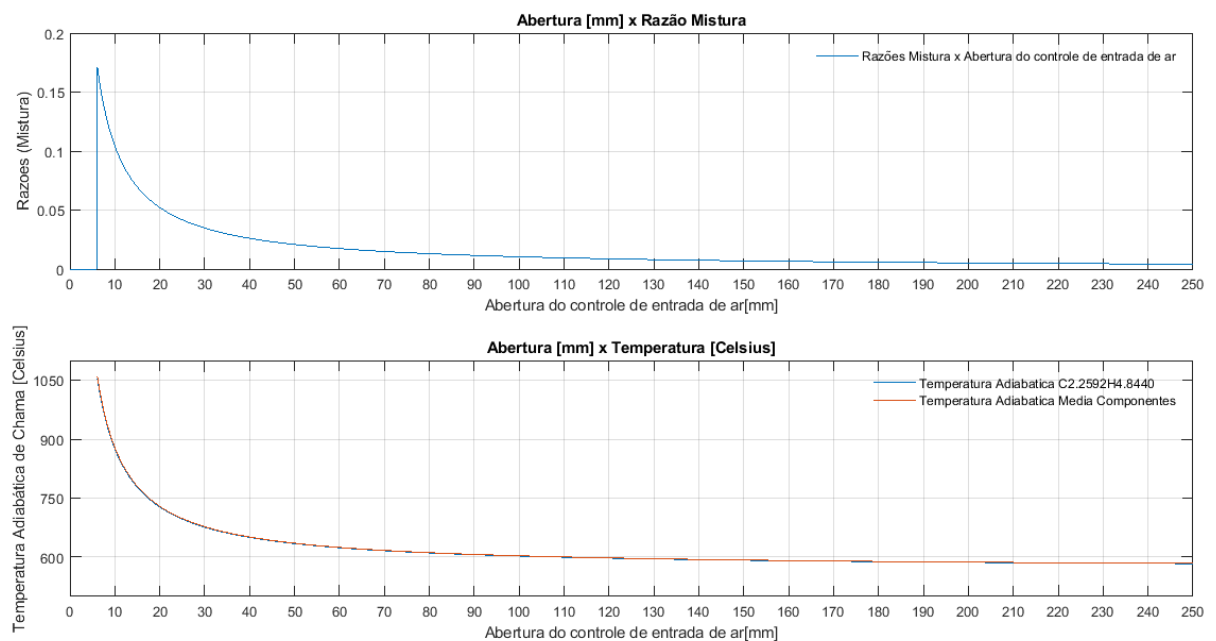


Figura 29 – Tempo de Consumo e Fluxo Mássico em função da Pressão de Operação
Modelo 27 - Orifício = 0,8mm , Bocal = 0,8 , Abertura = 9mm

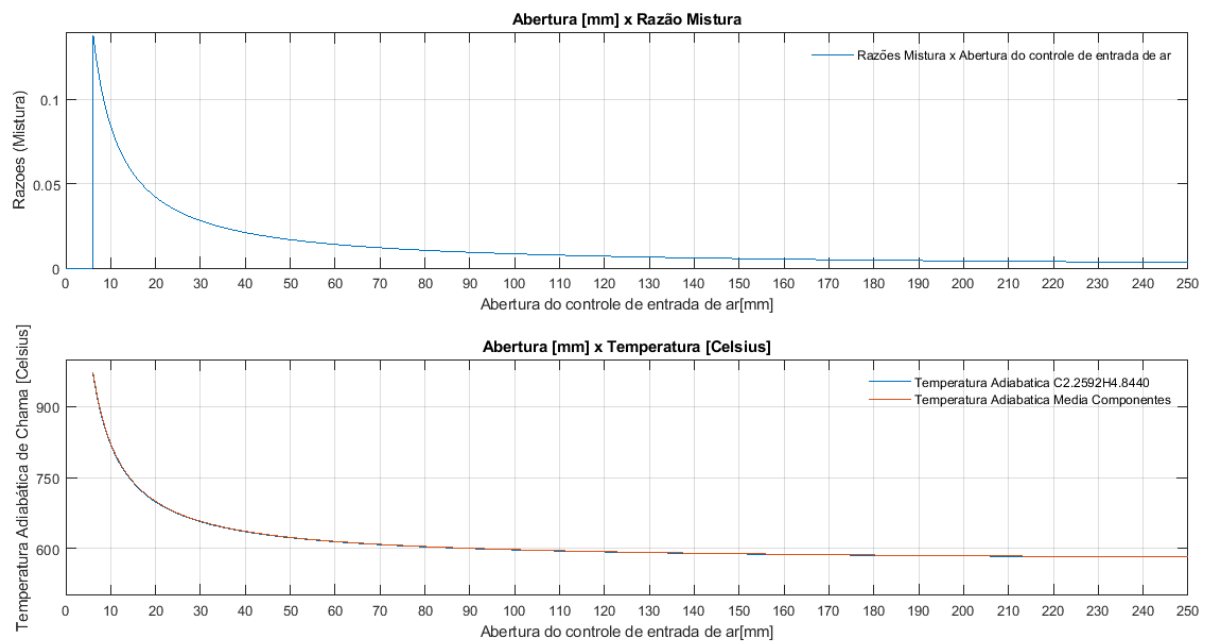


Figura 30 – Tempo de Consumo e Fluxo Mássico em função da Pressão de Operação
Modelo 28 - Orifício = 0,8mm , Bocal = 0,99 , Abertura = 9mm

2.1.5 Transferência de Calor para Ambiente

As perdas do sistema serão dadas pelas Eqs. (1.53) e (1.54) cuja condutividade térmica depende da temperatura (CENGEL, 2015a).

Após calcular as perdas referentes à condução, convecção inerentes ao forno, câmara de combustão é possível saber a quantidade mínima de calor a qual deve ser gerada pela combustão dos gases dentro da câmara de combustão para manter a temperatura nos níveis requeridos pelo processo de forjamento dos materiais, como por exemplo na Tab. (1).

Algumas estimativas preliminares foram efetuados utilizando os dados de materiais acessíveis presentes no mercado. Nesse tipo de projeto é importante observar a disposição do sistema e a retração linear dos materiais utilizados em cada parte deste.

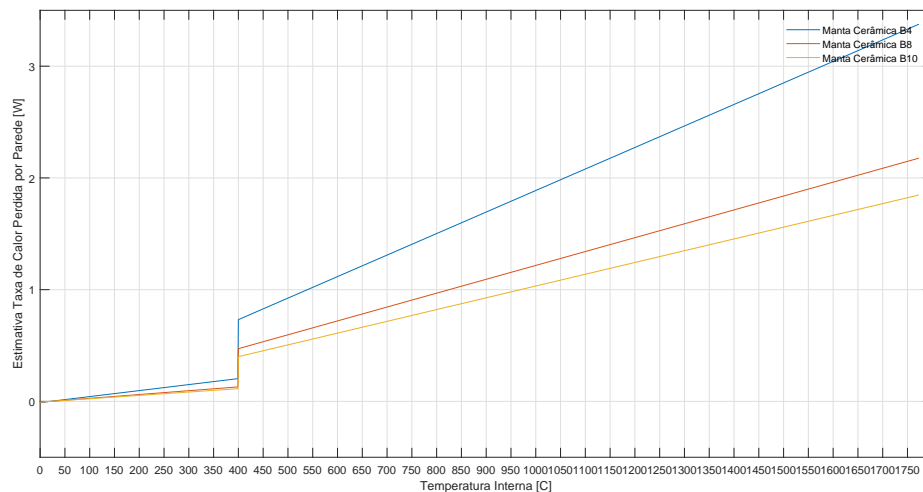


Figura 31 – Estimativa Preliminar Taxa de Calor Materiais

Para melhor escolha do material, devido as diferentes propriedades, foram traçados resultados referentes à três diferentes opções de mantas térmicas da linha Durablanket da Unifrax⁵.

⁵ Unifrax - Fabricante de Materiais Isolantes com distribuição no Brasil. Informações de condutividade térmicas disponibilizadas no catálogo dos produtos

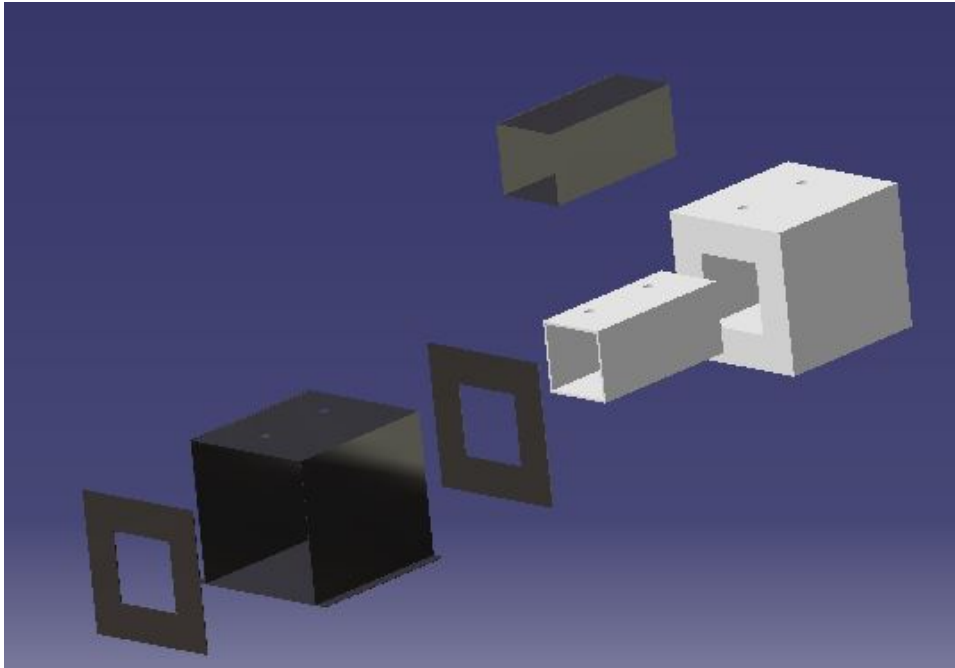


Figura 32 – Esboço Preliminar Forno

2.2 Construção

2.2.1 Recomendações de Projeto

O queimador atmosférico projetado não possui dificuldades construtivas significativas, todavia é importante ser cauteloso em relação a alguns detalhes, os quais podem facilitar a construção e evitar que seja necessário terceirizar serviços altamente especializados.

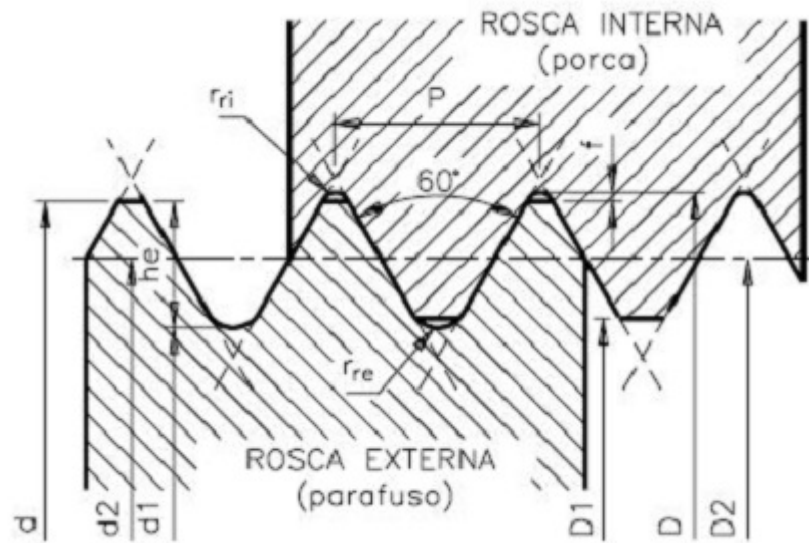
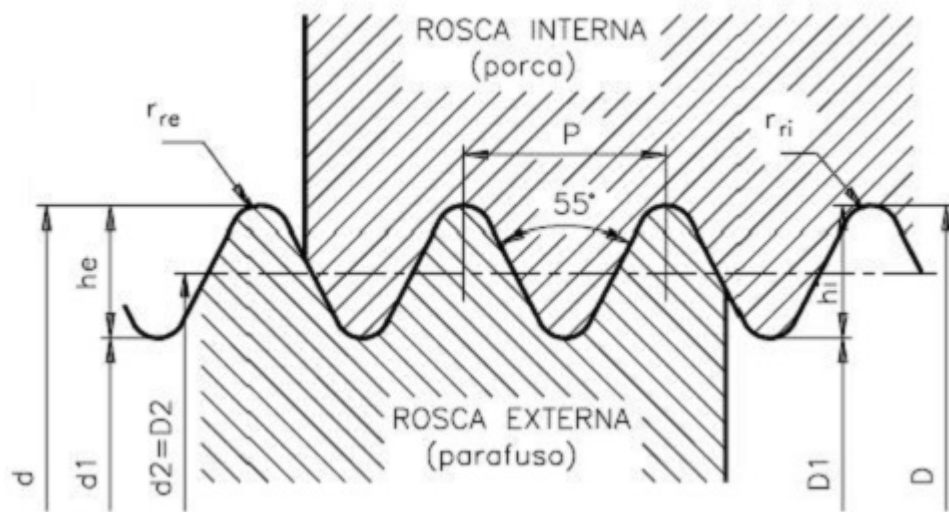
A usinagem de peças com geometrias de diâmetro variável e rosca nas extremidades pode trazer algumas dificuldades associadas ao posicionamento da peça no torno, assim como o comprimento de roscas internas e diâmetro interno dos tubos podem limitar a ação das ferramentas de corte durante a usinagem. Para evitar roscas interna e externa nas conexões entre o bocal (seção 3.2.2), câmara de mistura (seção 3.2.2) e cilindro de aspiração (seção 3.2.2) foi proposta a solução de fabricação de buchas com roscas internas (seções 3.2.2 e 3.2.2) posicionadas externamente às peças que devem ser conectadas, evitando a execução de roscas internas com grande comprimento.

A altura do filete da rosca h_e pode ser calculada pela Eq. (2.2) para roscas métricas e Eq. (2.3) para roscas witworth.

6

$$h_e = 0,61343P_{métrica} \quad (2.2)$$

⁶ Fonte: Aula 9 - Dimensionamento de roscas, último acesso 29/05/2019

Figura 33 – Rosca Métrica ⁶Figura 34 – Rosca Witworth ⁶

$$h_e = h_i = 0,6403P_{witworth} \quad (2.3)$$

$$P_{witworth} = \frac{1''}{N^{\circ}Filetes} [in] = \frac{25,4}{N^{\circ}Filetes} [mm] \quad (2.4)$$

Portanto é importante verificar as espessuras efetivas de parede dos tubos após a usinagem das roscas, já que uma rosca witworth de 18 fios por polegada retira material equivalente a altura de 0,9 mm da parede da peça usinada e uma rosca métrica de passo 1,5mm resultará em 0,92 mm de material retirado da espessura do tubo por exemplo.

Pequenas espessuras de parede neste projeto podem representar dois possíveis problemas relevantes que merecem atenção:

- (i) A presença de baixa resistência a solicitações mecânicas da estrutura do queimador, principalmente em regiões em que há concentradores de tensão. Essas regiões naturalmente acabam sendo presentes próximo às roscas, já que as roscas são elementos de conexão entre as partes do queimador e eventualmente estão próximas a regiões com variações significativas de dimensão e presença de cantos vivos.
- (ii) No caso do bocal e difusor em que há direções de corte inclinadas para a usinagem do cone, há a possibilidade de dificuldade construtiva em caso de tornos operados manualmente e alta solicitação mecânica da peça devido a força de corte durante a usinagem (SILVA, 2004).

O posicionamento e alinhamento de peças do sistema pode gerar problemas durante a montagem e operação, portanto devido ao comprimento do duto de condução do gás (seção 3.2.2) fez-se necessário acrescentar uma peça, chamada de "*Guia*" (Fig. 3.2.2) para gerar um segundo ponto de apoio para o duto com furação concêntrica ao furo da tampa do cilindro de aspiração (Fig. 3.2.2).

Caso seja decidido por projetar e construir o próprio bico (seção 3.2.2), atentar-se ao comprimento do mesmo em relação ao comprimento da broca a ser utilizada no orifício do duto, pois brocas de pequenos diâmetros geralmente são curtas e consequentemente seria necessário buscar outros métodos de usinagem como a eletroerosão por exemplo.

3 Resultados

3.1 Análise Numérica e Dimensionamento

A análise e dimensionamento do queimador se deu a partir dos resultados numéricos apresentados em forma de gráfico, como descrito na metodologia. O resultado alcançado, considerando as limitações geométricas e de acessibilidade de materiais para construção no mercado, é descrito na Tab. (8). A partir da avaliação dos resultados numéricos obtidos e apresentados nas Tabs. (6) e (7) com suporte das limitações de projeto relacionadas as aplicações do queimador na Tab. (1), é possível perceber que o queimador projetado atenderá todas as ligas presentes na tabela com exceção das ligas de alumínio.

Apesar de não ter sido exposto nenhum modelo com resultados de temperatura mínima que fosse capaz de satisfazer os requisitos operacionais referentes às ligas de alumínio, bastava-se (i) aumentar o comprimento do cilindro regulador até uma dimensão suficientemente grande para entrar a quantidade de ar que resultasse na mistura equivalente à temperatura requerida para o processamento mecânico do alumínio ou (ii) *aumentar a largura do rasgo*. Todavia ambas as soluções resultariam em problemas, os quais poderiam ser considerados relevantes para o projeto do queimador; sendo resultado da primeira solução um queimador atmosférico ainda maior do que o projetado considerado de tamanho relativamente grande, e a segunda solução resultando em perda de controlabilidade da temperatura de chama e decaimento da temperatura máxima alcançada pelo queimador, podendo até impossibilitar o processamento de outras ligas. Portanto, decidiu-se por manter o queimador com capacidade limitada para atender as temperaturas de chama demandadas para o processamento das ligas presentes na Tab.(1) com exceção da liga de alumínio.

O tempo de consumo é neste caso é dado para a operação em potência máxima estipulada para este queimador, que no caso é dado por 25kPa, resultando em autonomia de cerca de 22,6h para um cilindro de 13kg, denominado comercialmente de P13.

Tabela 8 – Características Queimador Atmosférico Projetado

Queimador Atmosférico	
Temperatura Mínima	605,37°C
Temperatura Máxima	1722,39 °C
Controlabilidade Boa	$T < 863,45^{\circ}\text{C}$
Controlabilidade Média	$863,45^{\circ}\text{C} < T < 1013,56^{\circ}\text{C}$
Controlabilidade Ruim	$1013,56^{\circ}\text{C} < T$
Abertura (largura)	9 mm = 3 · 3 mm
Razão Bocal	0,3
Pressão Máxima Operação	25KPa
Quantidade de Calor Máxima	7,43 KW
Tempo de Consumo[Potência Máxima]	22,6 h
Quantidade de Cilindros P13 Requerida	1

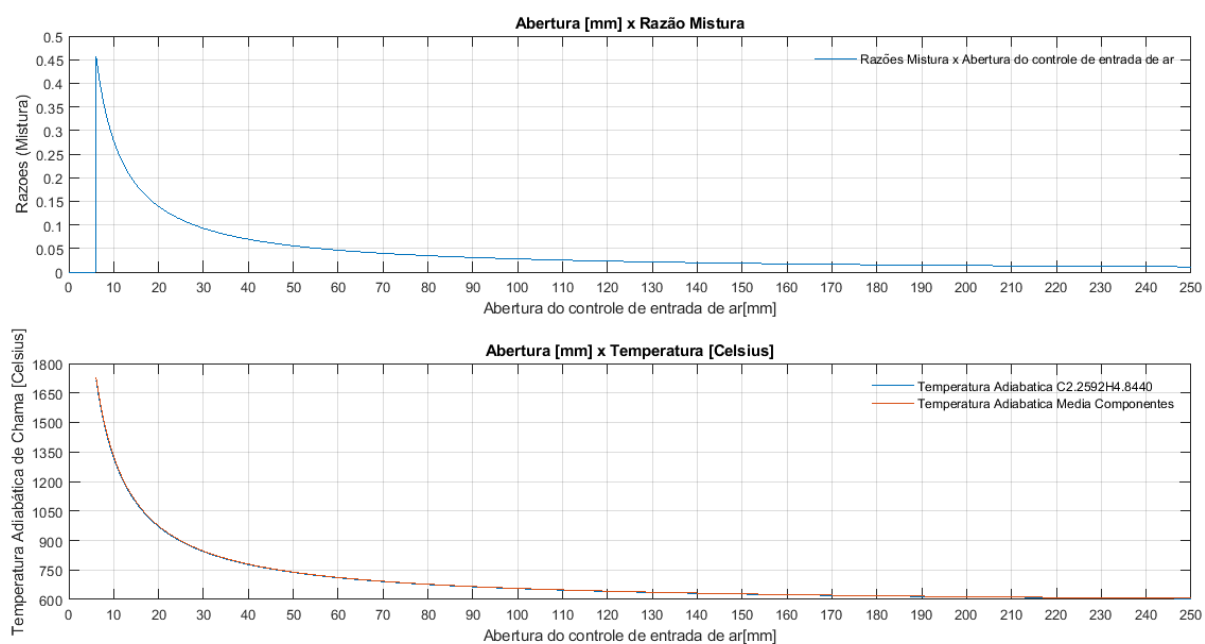


Figura 35 – Controlabilidade Razão Equivalente e Temperatura x Abertura

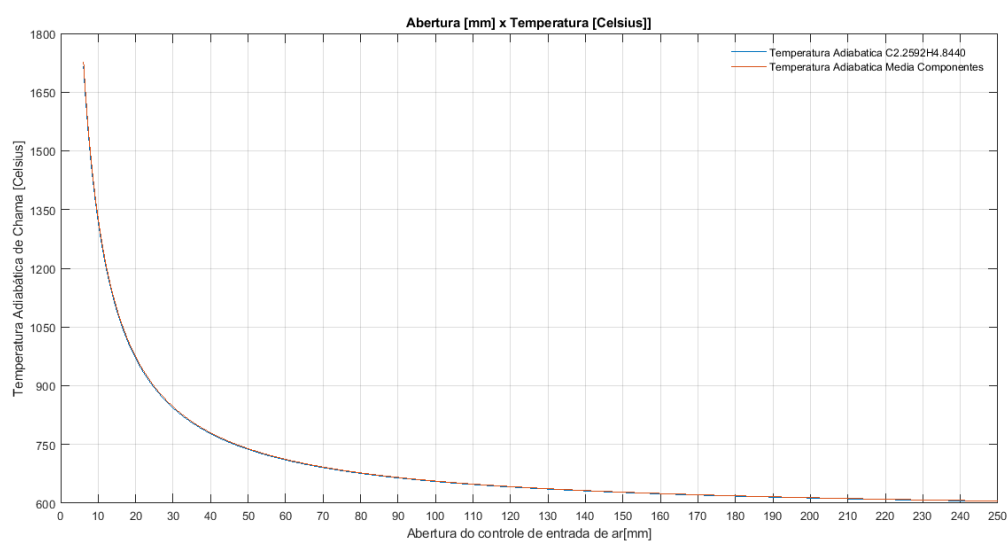


Figura 36 – Controlabilidade Temperatura Adiabática de Chama x Abertura

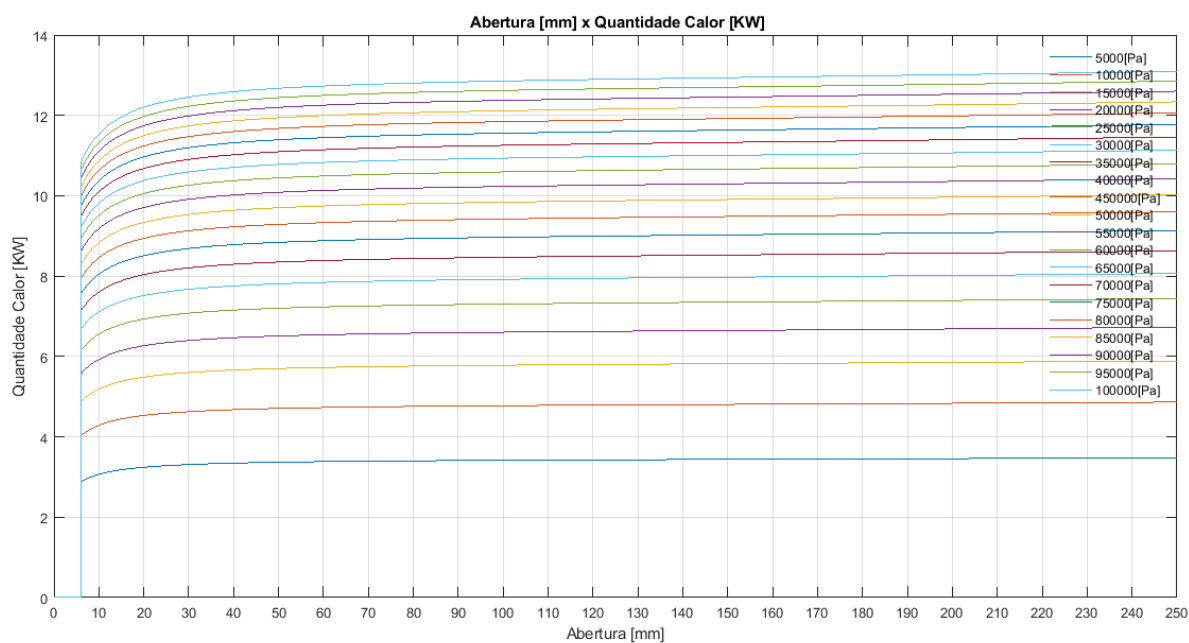


Figura 37 – Quantidade de Calor

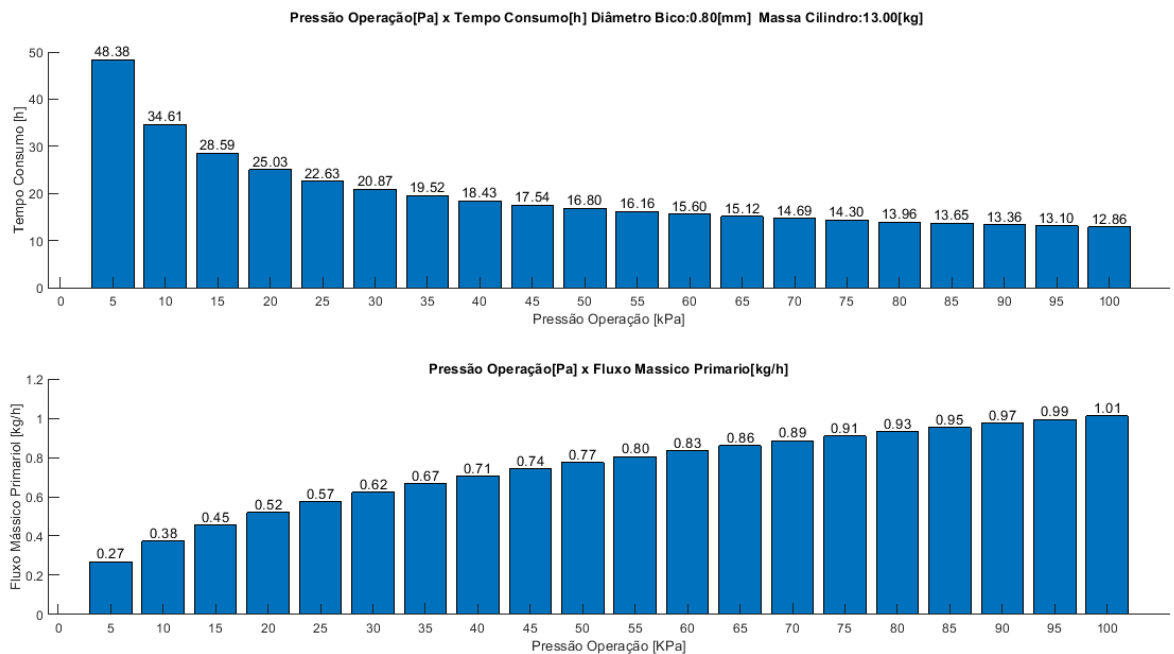


Figura 38 – Autonomia e Fluxo Mássico Primário

3.2 Projeto Mecânico

3.2.1 Estimativa de Custos

Para todo e qualquer projeto, há limitações relacionadas aos custos do mesmo e a viabilidade também pode ser afetada por limitações financeiras, geralmente o aumento de funcionalidades como o controle da temperatura e qualidade de um dispositivo refletem diretamente nos custos do mesmo.

Apesar do valor absoluto ter importância significativa para projetos e aplicações comerciais, para este trabalho em específico faz-se mais importante a análise da relação de custo entre as partes que compõem o queimador, pois é possível perceber pela Fig. (39) que para este projeto com objetivo de proporcionar a controlabilidade da temperatura de chama adiabática proveniente de um queimador atmosférico, as parcelas mais significativas são compostas pelo regulador de pressão (25,6%), bocal (16,1%) e difusor (16,1%). O custo da mão de obra das roscas (22%) também é consequência da presença de bocal e difusor, já que estas são responsáveis pela conexão dessas peças.

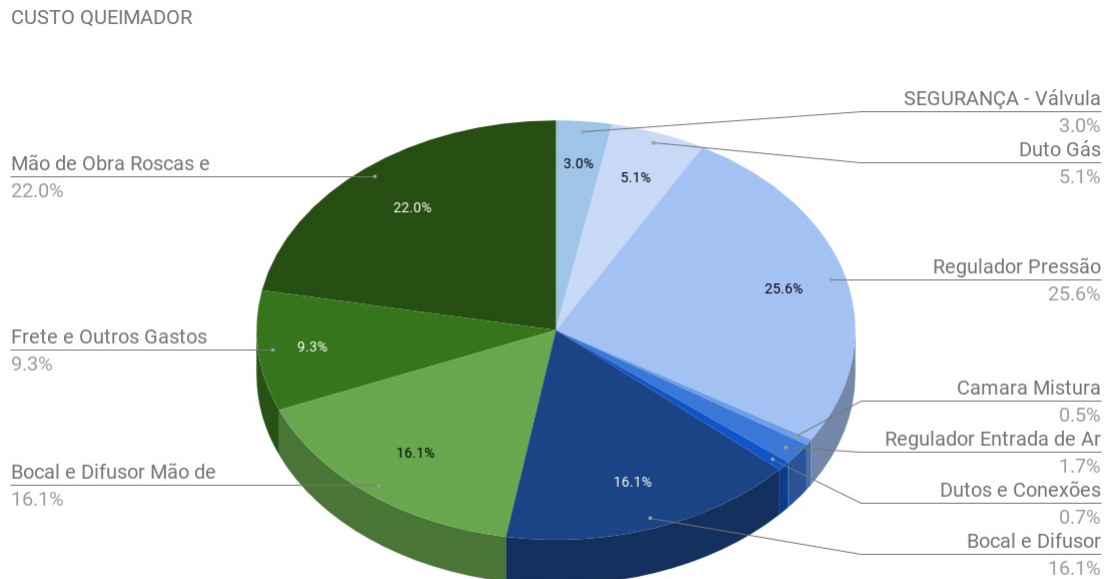


Figura 39 – Estimativas de Custo do Queimador

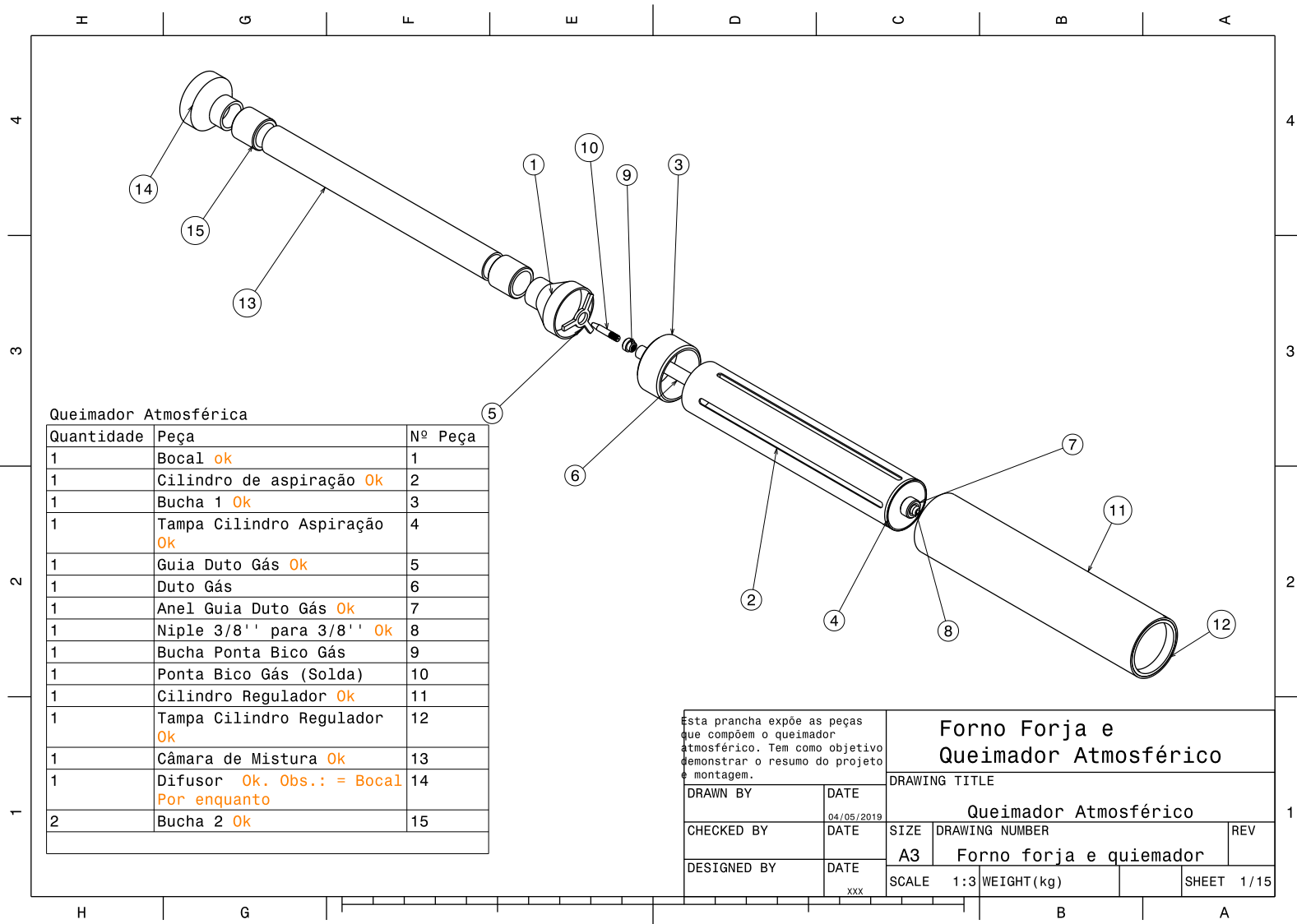
Vale salientar que esta é uma estimativa aproximada, portanto avaliações mais completas devem ser feitas para outros projetos, principalmente projetos com finalidades comerciais.

3.2.2 Desenho Mecânico

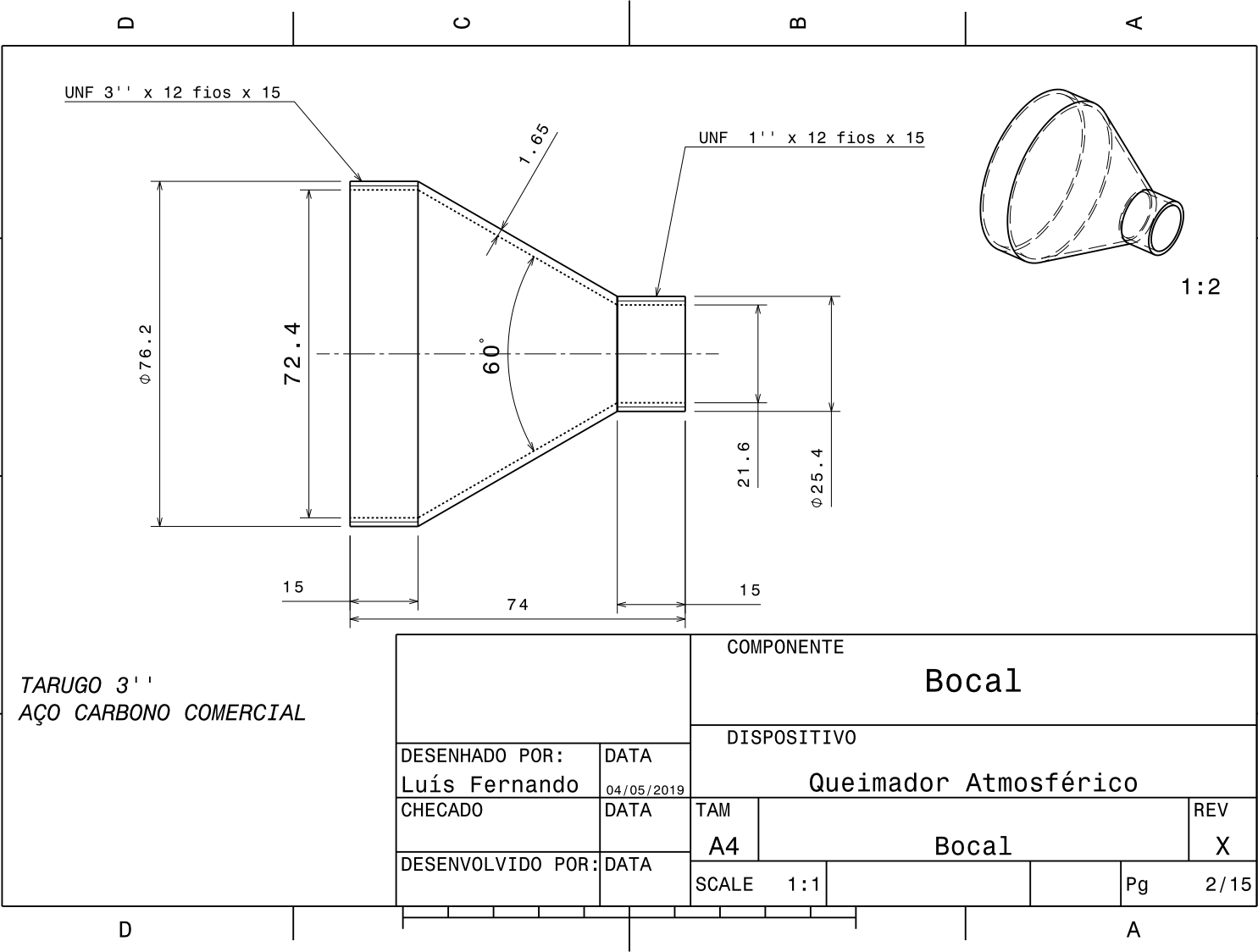
A partir das análises foi possível realizar o dimensionamento do queimador atmosférico com controle de temperatura e foi alcançado como resultado final o projeto mecânico que segue descrito pelos desenhos mecânicos a seguir com suas respectivas referências presentes neste trabalho:

- [3.2.2.1](#) -Resumo Projeto Queimador Atmosférico Vista Isométrica
- [3.2.2.2](#) - Bocal
- [3.2.2.3](#) - Cilindro Aspiração
- [3.2.2.4](#) - Bucha 1
- [3.2.2.5](#) - Tampa Cilindro Aspiração
- [3.2.2.6](#) - Guia Duto Gás
- [3.2.2.7](#) - Duto Gás
- [3.2.2.8](#) - Anel Guia
- [3.2.2.10](#) - Ponta Niple
- [3.2.2.11](#) - Bico Injetor - "Ponta Bico Solda Gás"
- [3.2.2.12](#) - Câmara Mistura
- [3.2.2.13](#) - Bucha 2

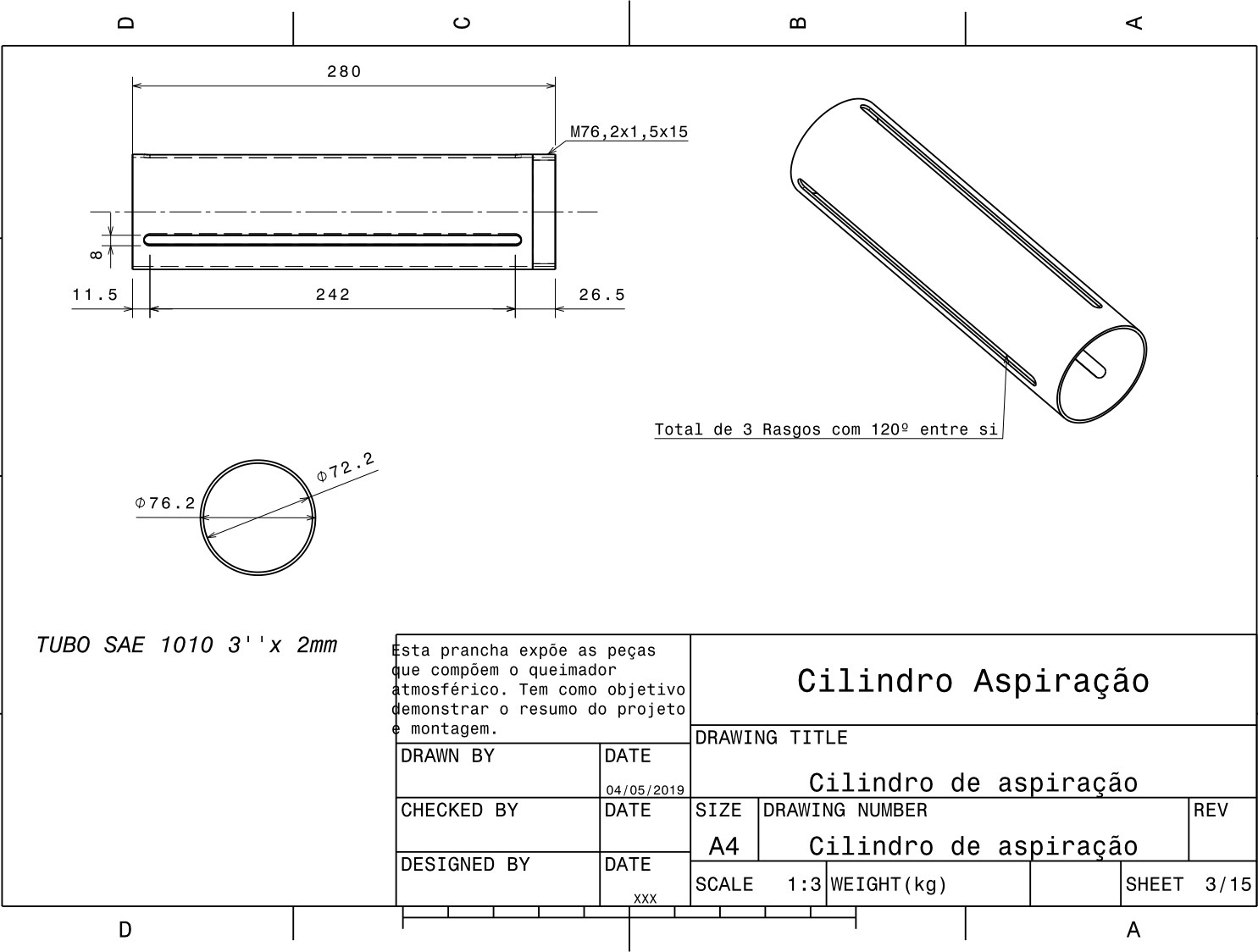
3.2.2.1 Esquemático Vista Isométrica



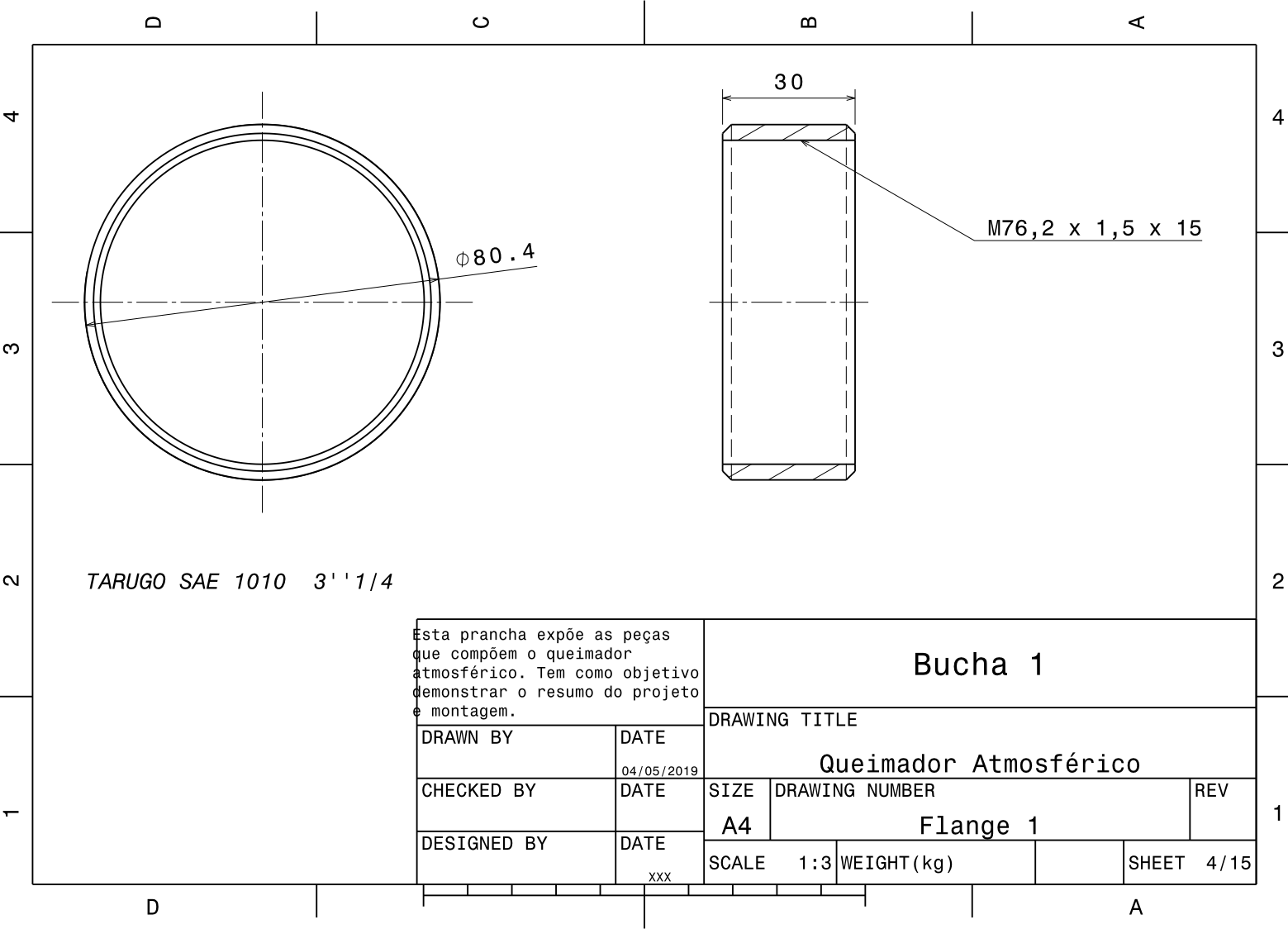
3.2.2.2 Bocal



3.2.2.3 Cilindro Aspiração



3.2.2.4 Bucha 1



Esta prancha expõe as peças que compõem o queimador atmosférico. Tem como objetivo demonstrar o resumo do projeto e montagem.

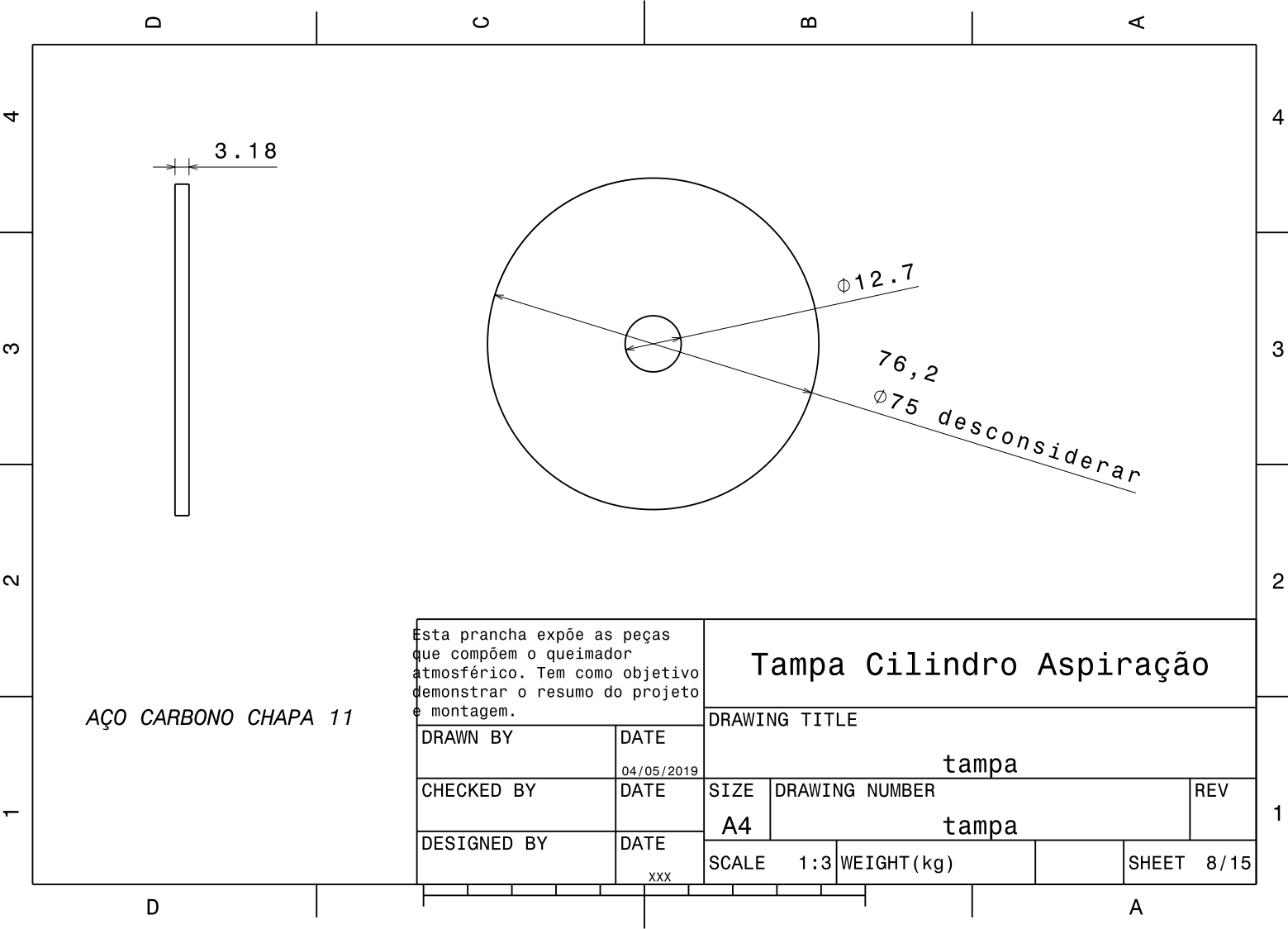
DRAWN BY	DATE
CHECKED BY	DATE
DESIGNED BY	DATE

04/05/2019

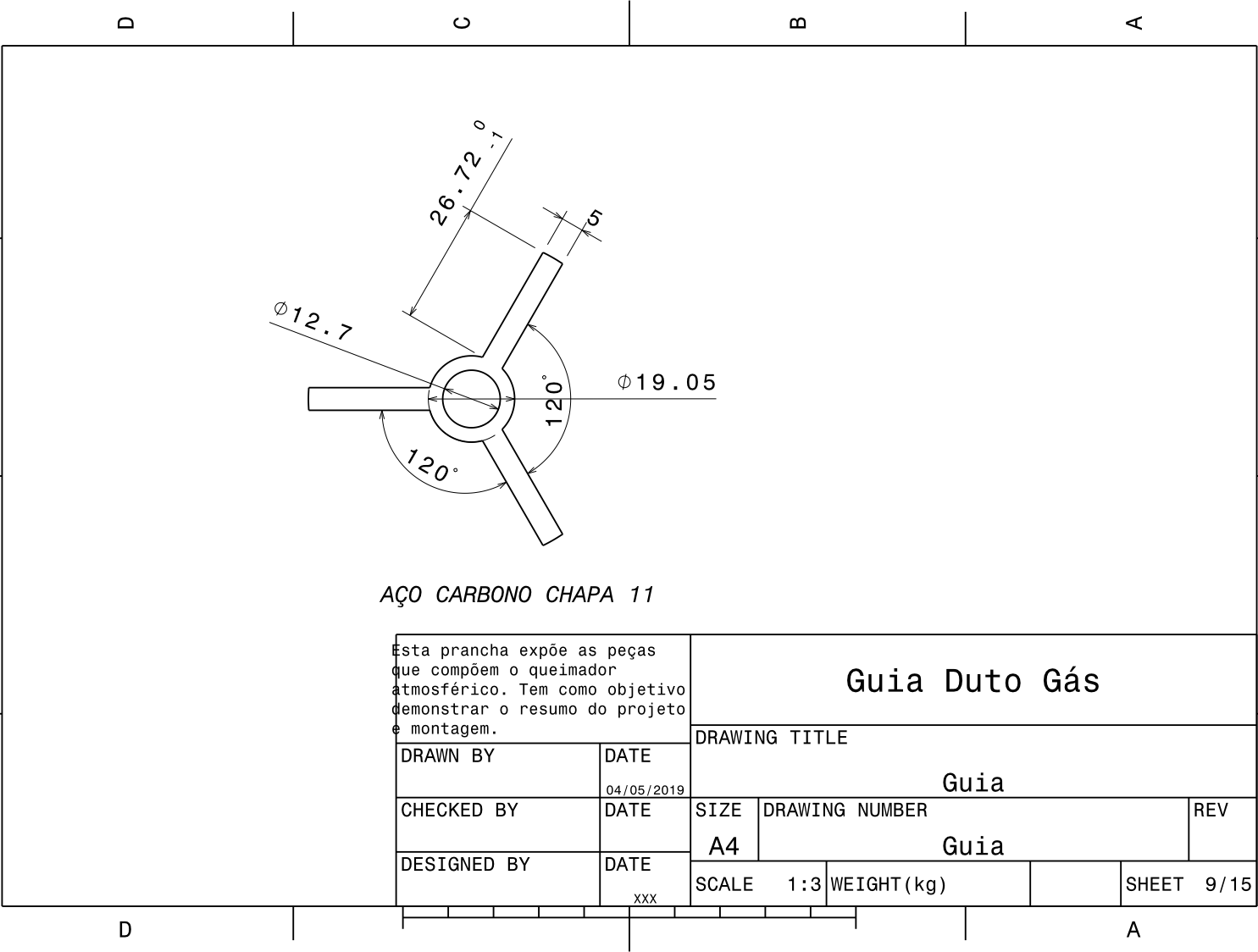
xxx

Bucha 1			
DRAWING TITLE			
Queimador Atmosférico			
SIZE	DRAWING NUMBER		REV
A4	Flange 1		1
SCALE	1:3	WEIGHT (kg)	SHEET 4/15

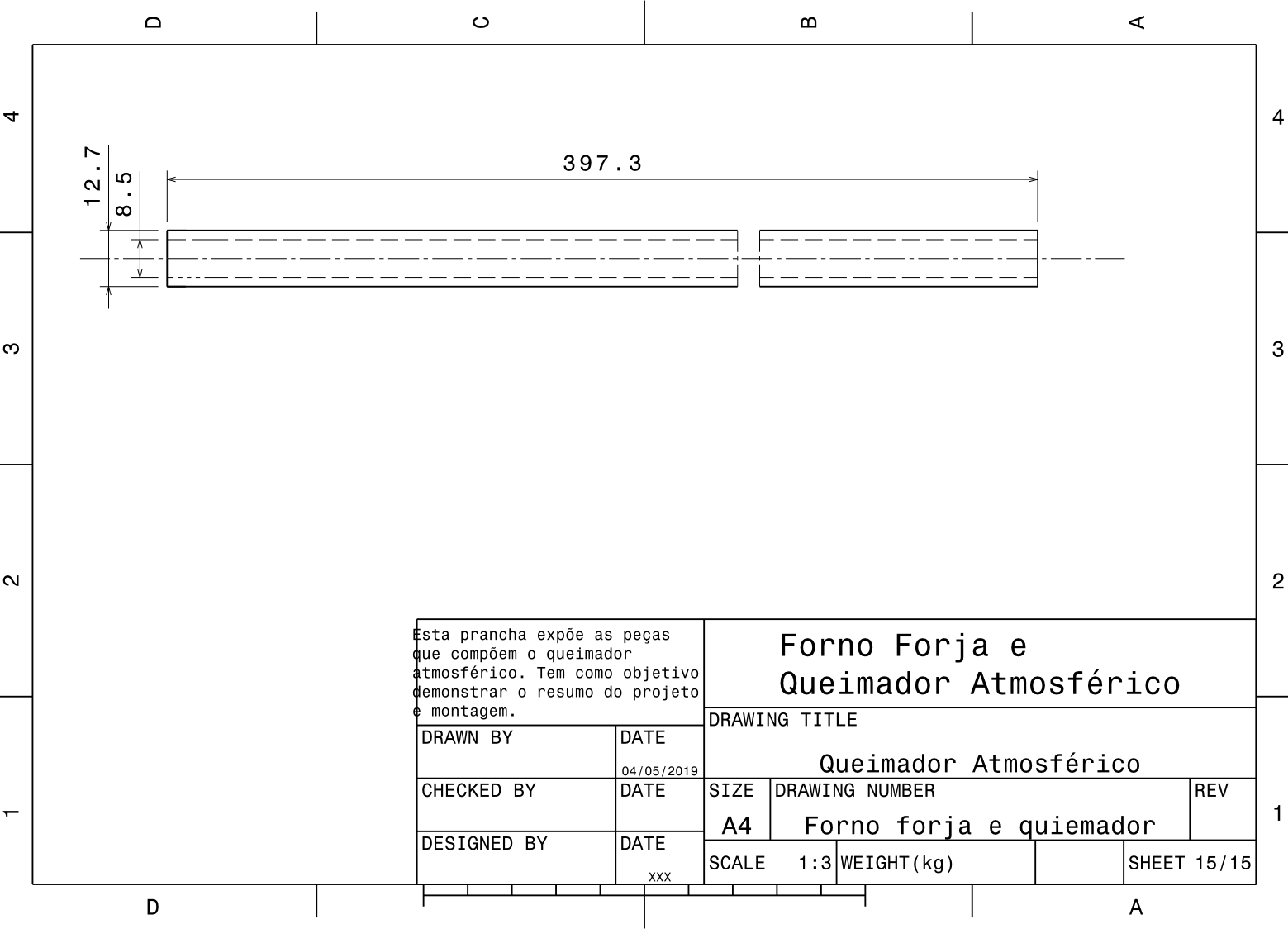
3.2.2.5 Tampa Cilindro Aspiração



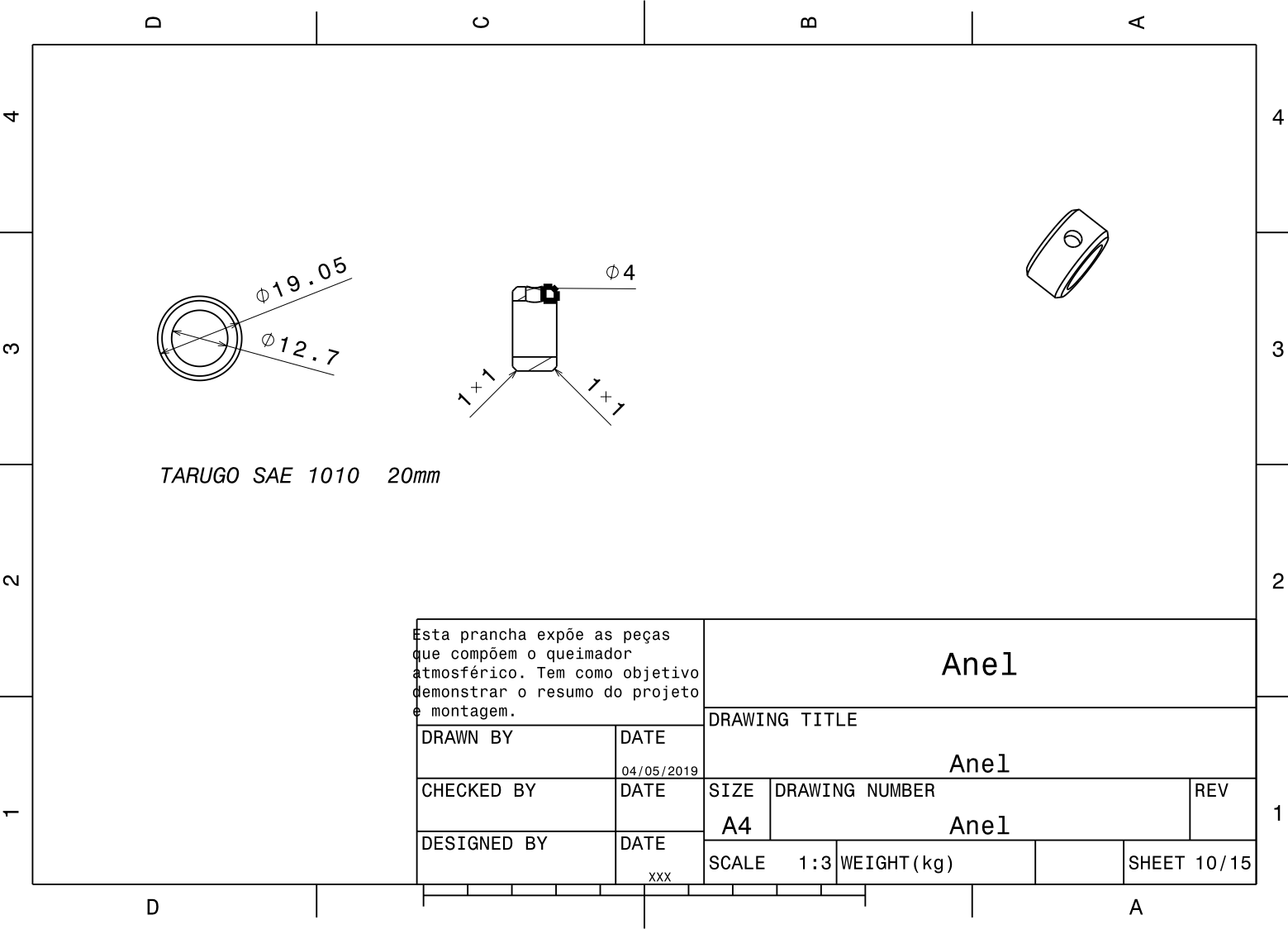
3.2.2.6 Guia Duto Gás



3.2.2.7 Duto Gás

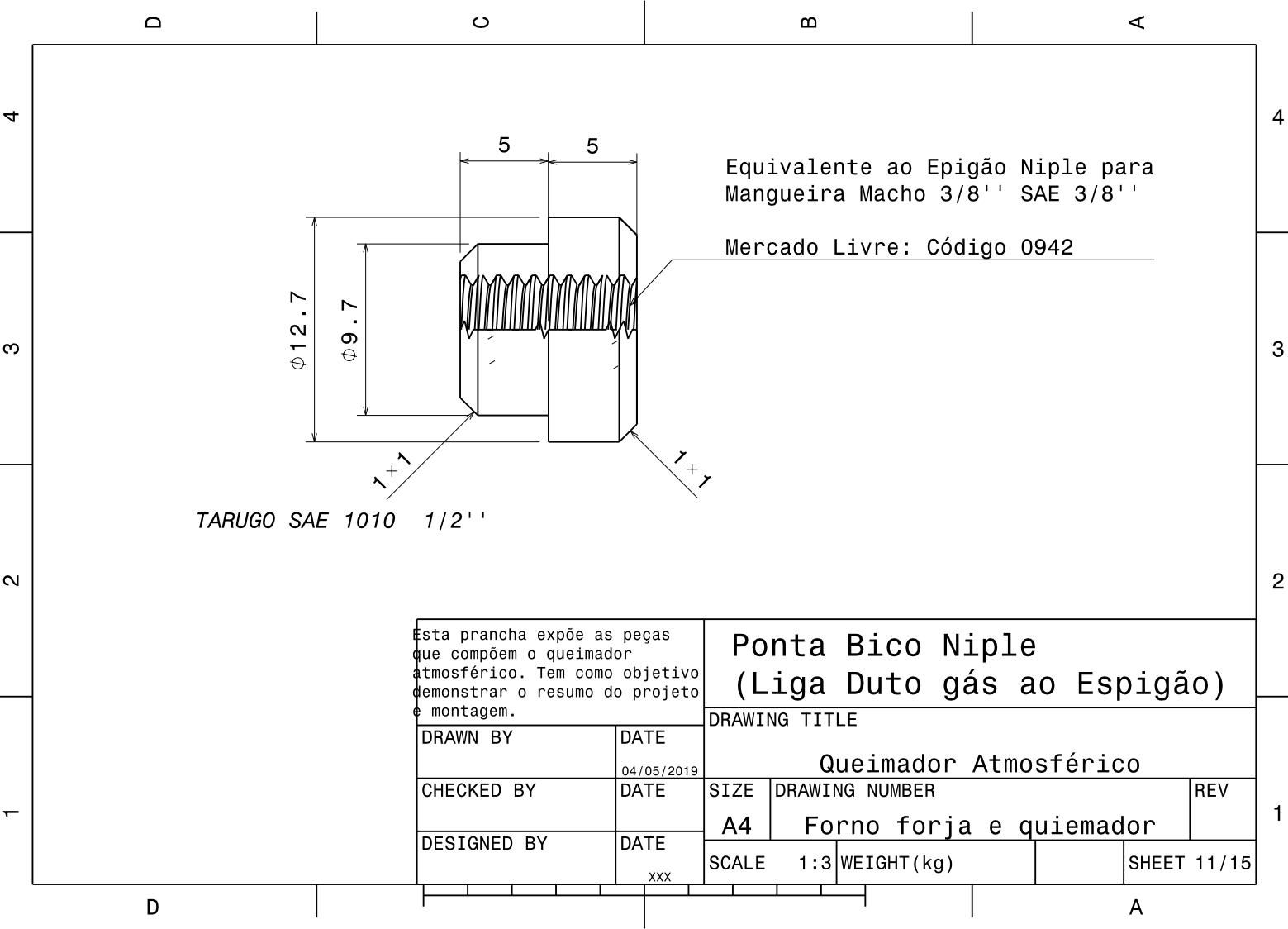


3.2.2.8 Anel

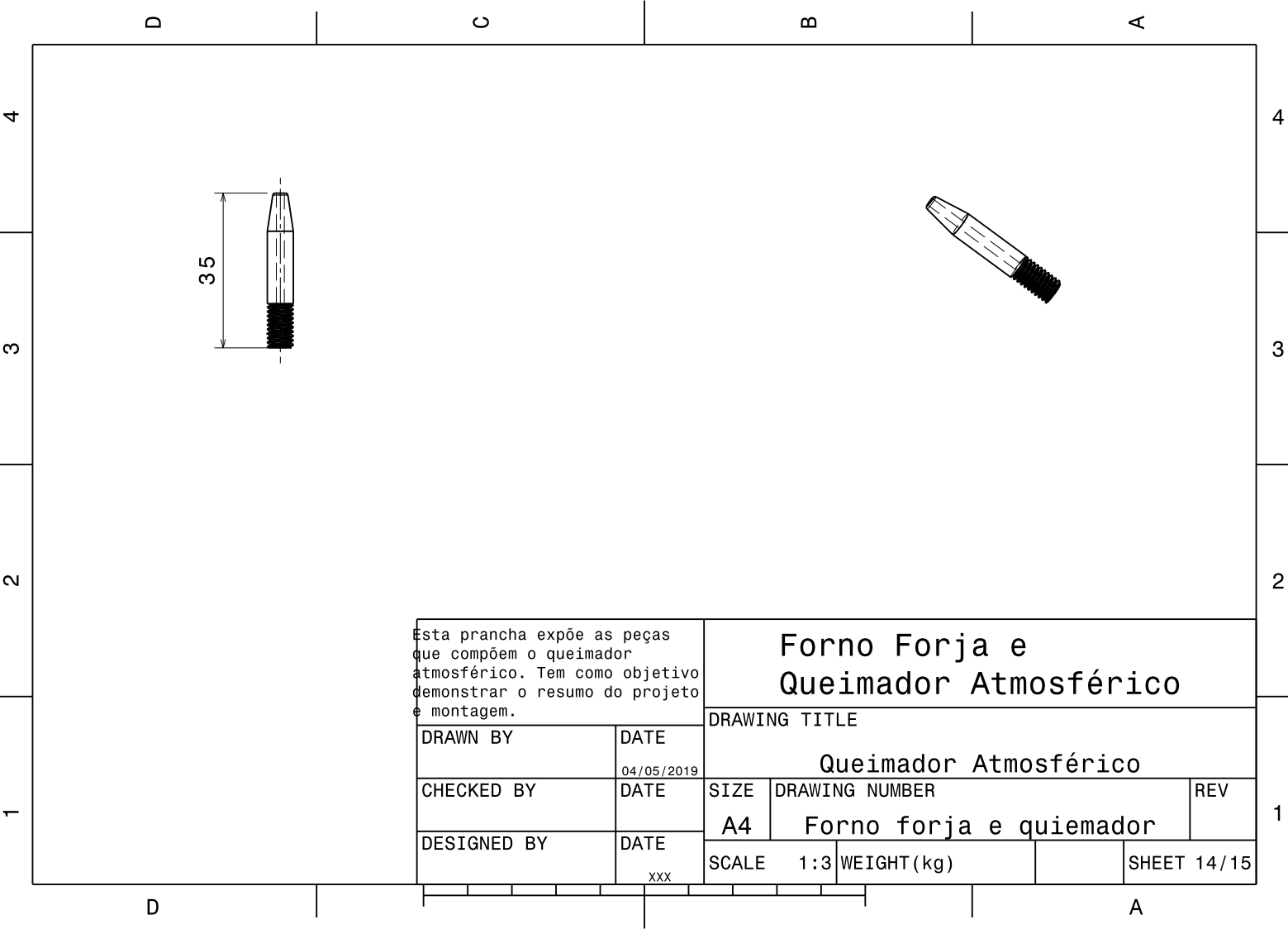


Esta prancha expõe as peças que compõem o queimador atmosférico. Tem como objetivo demonstrar o resumo do projeto e montagem.		Anel			
DRAWN BY		DRAWING TITLE			
CHECKED BY		Anel			
DESIGNED BY		Anel			
DATE		SIZE		DRAWING NUMBER	
04/05/2019		A4		REV	
DATE		SCALE		WEIGHT (kg)	
xxx		1:3		SHEET 10/15	

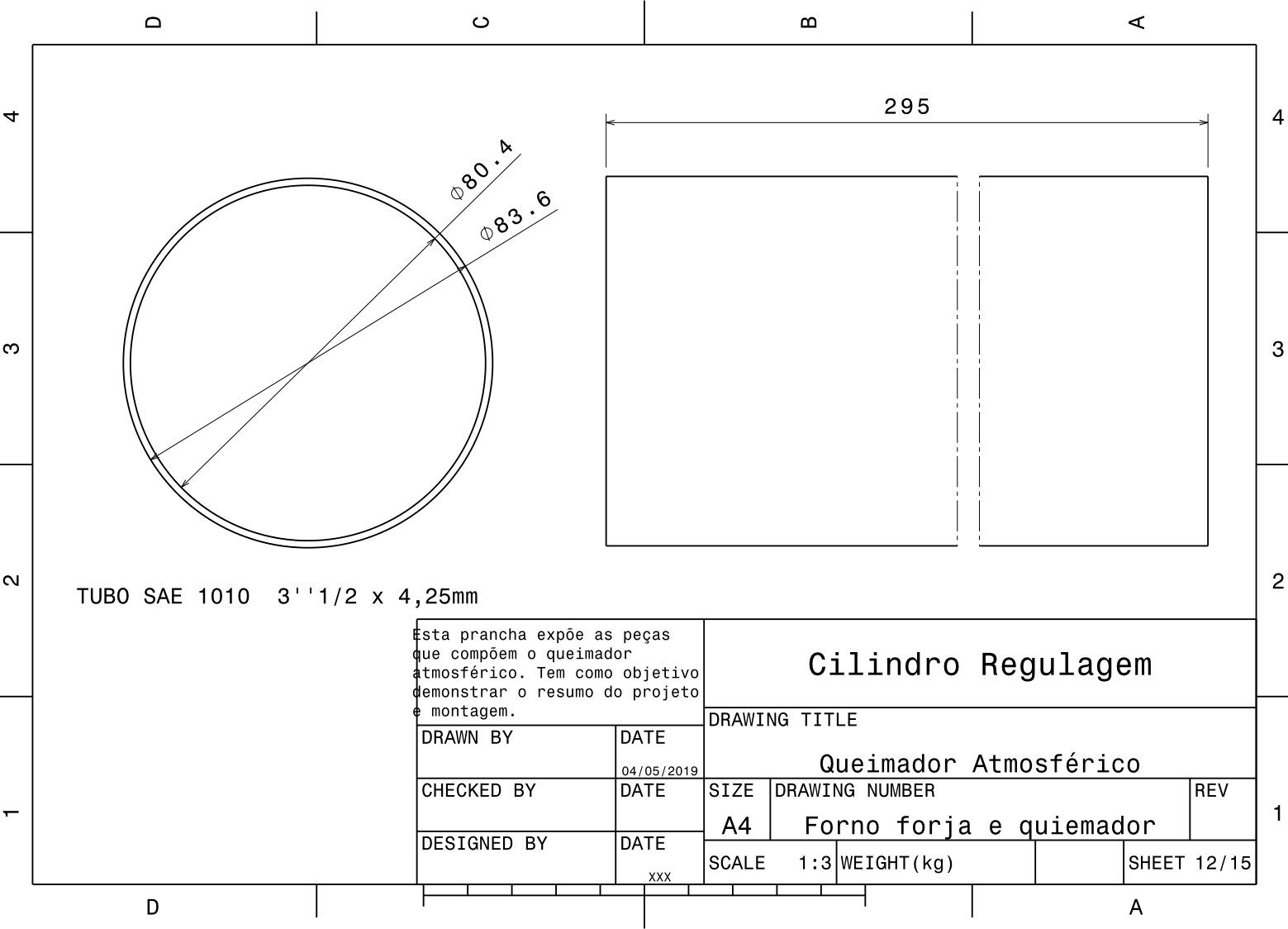
3.2.2.9 Ponta Niple



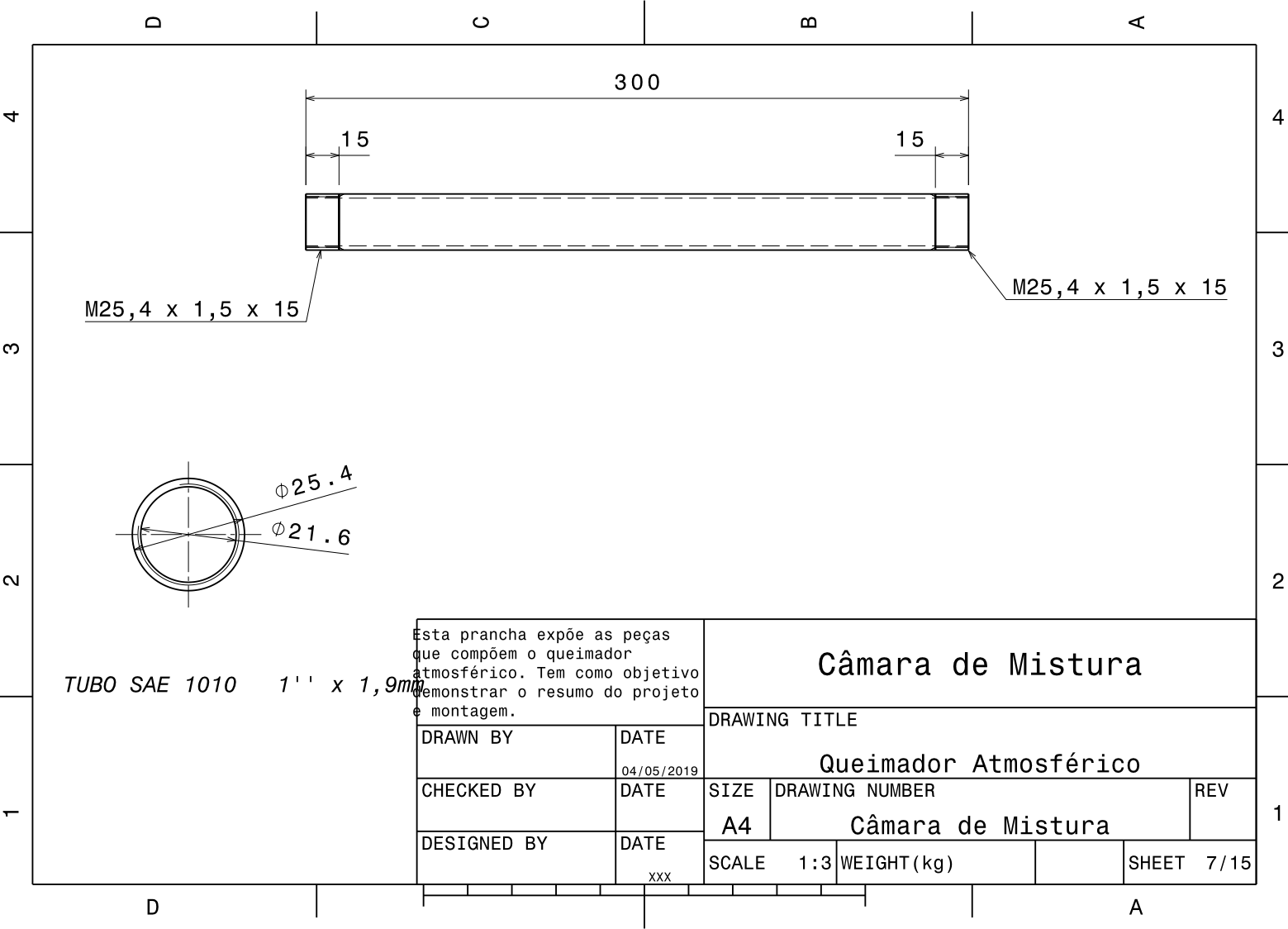
3.2.2.10 Bico Ejetor (Bico Solda MIG)



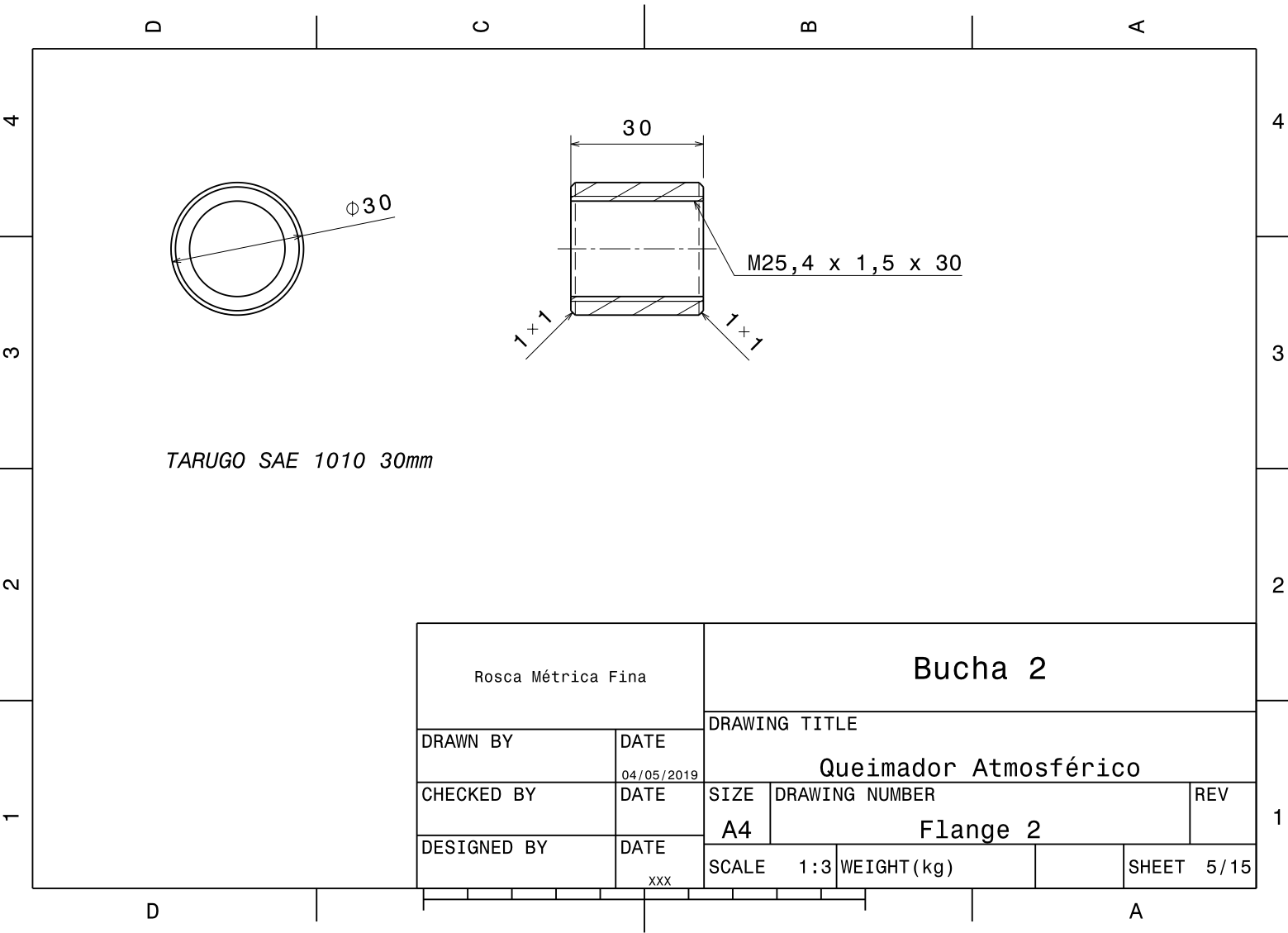
3.2.2.11 Cilindro Regulador



3.2.2.12 Câmara de Mistura dos Gases



3.2.2.13 Bucha 2



4 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

4.1 Conclusão

Este trabalho de conclusão de curso teve como objetivo o projeto e desenvolvimento de um queimador atmosférico com controle de temperatura, para melhorar a qualidade do processo de forjamento aplicado à cutelaria por meio de um melhor controle da temperatura ao longo do processo.

A partir da revisão bibliográfica foi possível perceber que há disponível e de forma bem consolidada toda a teoria necessária para o desenvolvimento de um dispositivo com as características propostas, assim como algumas referências a respeito da construção de queimadores como por exemplo (BAUKAL, 2003). Todavia não há informações claras e diretas a respeito da construção de dispositivos com temperaturas controláveis e seus respectivos resultados, bem como dados e tabelas disponíveis.

A utilização de bocais é praticada nos projetos comercializados atualmente com razões equivalentes a 0,85 , o que limita a faixa de temperaturas adiabáticas de chama a valores próximos a 880°C como é possível perceber na Tab. (7) e Figs. (82) e (85). O controle da temperatura é feito de forma semelhante, todavia não há referências de escala bem definidas de acordo com a abertura total; geralmente os usuários utilizam escalas de cores da chama e devido ao fato dos cilindros reguladores serem relativamente muito curtos nos queimadores comerciais, a temperatura de chama resultante não possui boa controlabilidade. Nas Figuras (58) e (61) é possível perceber a influência da largura dos rasgos em relação à controlabilidade das temperaturas de chama. As Figuras (64), (67), (70), (73) permitem observar melhor os efeitos das pequenas larguras e grandes comprimentos dos rasgos no cilindro de aspiração para a controlabilidade.

Fatores relevantes ao projeto voltados para a construção também incrementaram significativa dificuldade ao processo, já que existem peças com roscas, cones internos e externos os quais demandam maior atenção às dimensões. Peças com intersecção deslizante também aumentaram a dificuldade do projeto, devido a falta de acessibilidade comercial a tubos contidos nos catálogos, a maioria das indústrias de tubos no Centro Oeste não possui grande parte dos tubos catalogados com determinadas dimensões. Portanto fez-se necessário o orçamento e encomenda desse material de fornecedores do estado de São Paulo.

Por fim, a partir das análises realizadas para o desenvolvimento do projeto, apesar das dimensões do queimador ultrapassarem consideravelmente às dimensões empregadas

em queimadores atmosféricos comerciais, pode-se afirmar que o projeto atingiu os resultados numéricos esperados e delimitados de controlabilidade da temperatura para atender todas as ligas da Tab.(1) com exceção das ligas de alumínio.

4.2 Trabalhos Futuros

Ao longo do desenvolvimento deste projeto, foi possível perceber alguns possíveis objetos de estudo futuros:

- Bicos injetores: estudo da geometria dos bicos injetores e o seu posicionamento em relação a garganta do bocal. Ver ([BUCKINGHAM; EDWARDS, January, 1920](#)).
- Câmara de Mistura: otimizar a mistura dos gases na câmara de mistura por meio de diferentes geometrias comprimento ou inserção de geradores de vortex.
- Geometria da Câmara de Combustão: estudar influências da geometria da câmara de combustão e direção de entrada das chamas.
- Difusor: controle da velocidade da chama e estudo do balanço energético em relação a energia interna, cinética na saída do difusor.
- Geometria da Abertura: estudo de diferentes geometrias do rasgo para otimizar a controlabilidade em determinadas faixas de temperatura. *Esse estudo possivelmente possibilitará o projeto de queimadores atmosféricos com boa controlabilidade de chama, a partir de cilindros reguladores de menores dimensões. Também poderia possibilitar que um mesmo queimador atingisse maiores faixas de temperaturas, atendendo todas as ligas da Tab. (1) por exemplo.*

Ex.: Diferentes larguras de cortes retangulares ou geometrias de corte como triangulares, elipsoidais, entre outras.

Referências

- ANDERSON, J. J. D. *Modern Compressible Flow: With Historical Perspective*. 3ª edição. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2003. ISBN 0-01-242443-5. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 45.
- ANDERSON, J. J. D. *Fundamentals of Aerodynamics*. 5ª edição. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2011. ISBN 978-0-07-339810-5. Citado 5 vezes nas páginas 13, 35, 36, 37 e 52.
- ANP AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, G. N. e. B. *RESOLUÇÃO ANP Nº 18, DE 2.9.2004 - DOU 6.09.2004*. [S.l.], 2004. 10 p. Citado na página 39.
- BAUKAL, J. C. E. *Industrial Burners - H A N D B O O K*. [S.l.]: CRC PRESS, 2003. ISBN 0-8493-1386-4. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 91.
- BERRY I. V. BRUMBAUGH, G. F. M. G. B. S. W. M. Design of atmospheric gas burners, bureau of standards paper nº 193. Washington, D C, p. 58, September, 1921. Citado 5 vezes nas páginas 13, 32, 33, 37 e 51.
- BRESCIANI, E. *Conformação Plástica dos Metais*. 4ª edição. ed. [S.l.]: Editora da Unicamp, 1991. Citado 5 vezes nas páginas 13, 25, 28, 29 e 30.
- BUCKINGHAM, E.; EDWARDS, J. D. Efflux of gases through small orifices, bureau of standards paper nº 359. Washington, D C, p. 42, January, 1920. Citado 3 vezes nas páginas 33, 35 e 92.
- CALLISTER, J. W. D. *Ciência e Engenharia de Materiais*. 9ª edição. ed. [S.l.]: LTC, 2016. ISBN ISBN. Citado na página 27.
- CENGEL, Y. A. *Heat and Mass Transfer*. 5ª edição. ed. 2 Penn Plaza, New York, NY 10121: McGraw-Hill Education, 2015. ISBN 978-0-07-339817-4. Citado 3 vezes nas páginas 13, 49 e 67.
- CENGEL, Y. A. *Thermodynamics, An Engineering Approach*. 8ª edição. ed. 2 Penn Plaza, New York, NY 10121: McGraw-Hill Education, 2015. ISBN 978-0-07-339817-4. Citado 6 vezes nas páginas 13, 32, 42, 43, 44 e 55.
- FERREIRA, R. S. *Conformação Plástica, Fundamentos Metalúrgicos e Mecânicos*. 2ª edição. ed. [S.l.]: Editora Universitária UFPE, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 13, 27 e 28.
- FOGÁS. *Composição Mistura Gás Liquefeito de Petróleo - Fogás*. Disponível em: <<https://www.fogas.com.br/residencia/propriedade-glp/>>. Citado na página 40.
- KEE, R.; MULLER, J. The chemkin thermodynamic database. Sandia National Laboratories Report, San Diego, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 48.
- MCBRIDE, S. G. B. J.; RENO, M. A. Coefficients for calculating thermodynamic and transport properties of individual species. 1993. Citado na página 41.
- NIST. *National Institute of Standards and Technology*. Disponível em: <<https://www.nist.gov/>>. Citado na página 46.

SILVA Álisson Rocha Machado e Marcio Bacci da. *Usinagem dos Metais*. 8ª edição. ed. [S.l.]: LEPU – Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2004. Citado na página 70.

TURNER, S. R. *An Introduction to Combustion, Concepts and Applications*. 2ª edição. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2000. ISBN ISBN. Citado 7 vezes nas páginas 45, 46, 47, 48, 50, 54 e 55.

ZAFER, G. R. L. N. Stability of gas pressure regulators. Department of Mechanical Engineering, Iowa State University, Ames, IA 50010, USA, p. 22, 2008. Citado na página 38.

Apêndices

APÊNDICE A – Resultados em função da Abertura

Gráficos e resultados em função da variação da largura do rasgo de abertura do cilindro de aspiração (seção 3.2.2).

Os resultados para fluxo mássico primário não estão em função da abertura e bocal, portanto são os mesmos para todos os modelos propostos nos apêndices A e B.

A.1 Modelo 11

A.1.1 Razão Mistura e Temperatura Adiabática de Chama em função da abertura

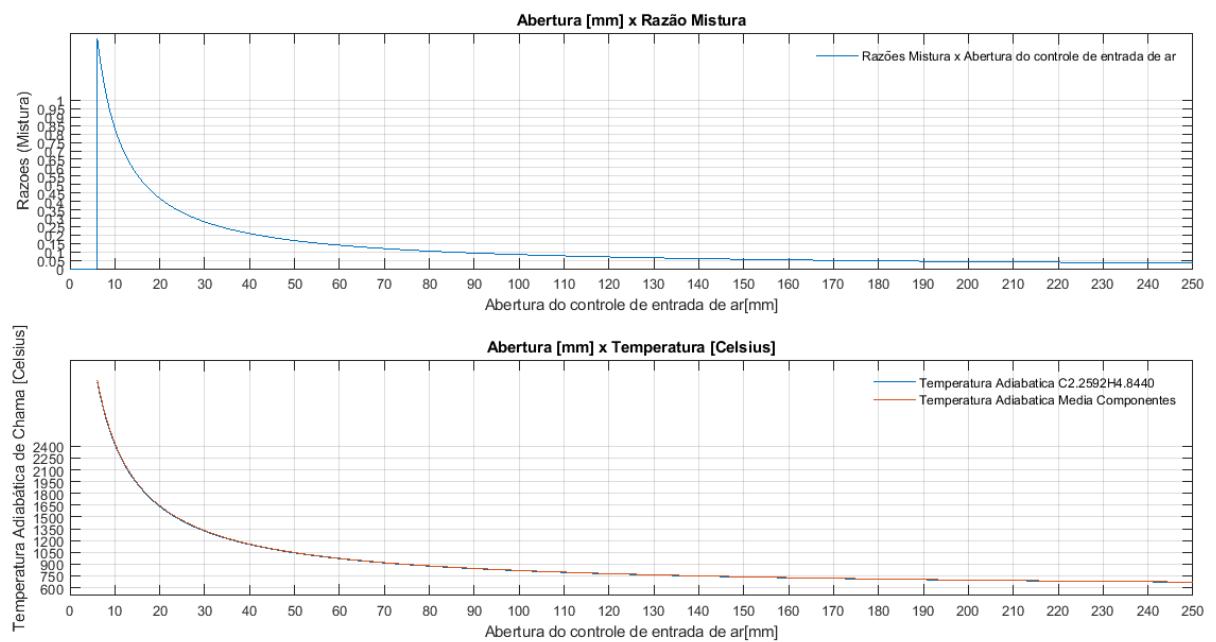


Figura 40 – Modelo 11 (tabela 6) - Controle Temperatura - Abertura e Razões Equivalentes

A.1.2 Quantidade de Calor

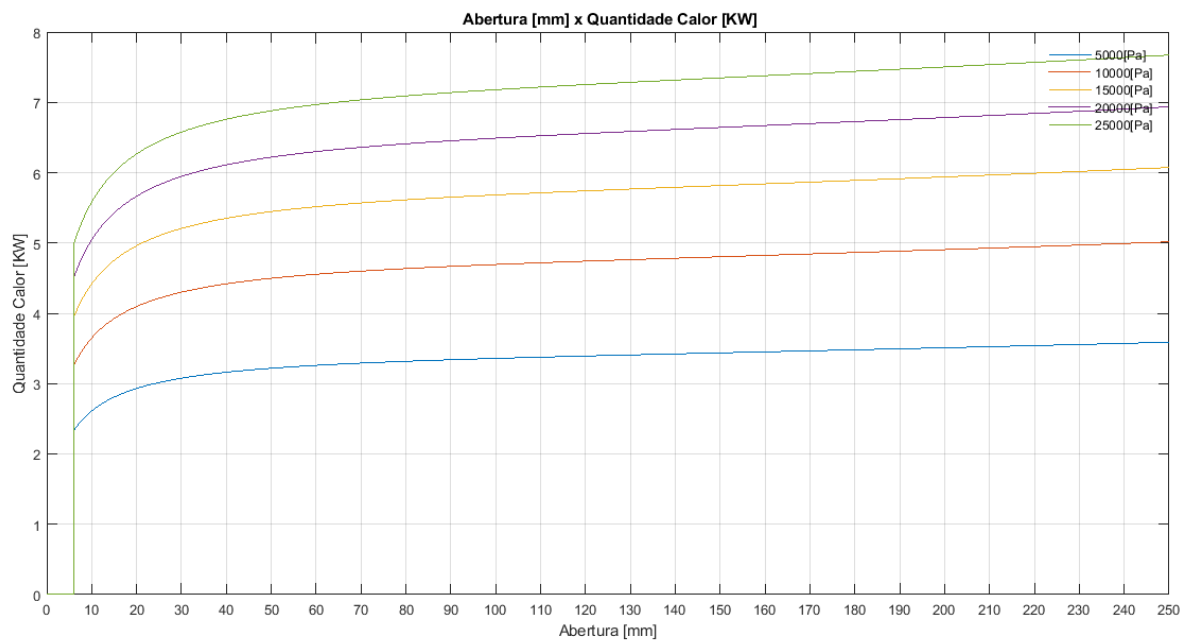


Figura 41 – Modelo 11 (tabela 6) - Quantidade de Calor

A.1.3 Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade

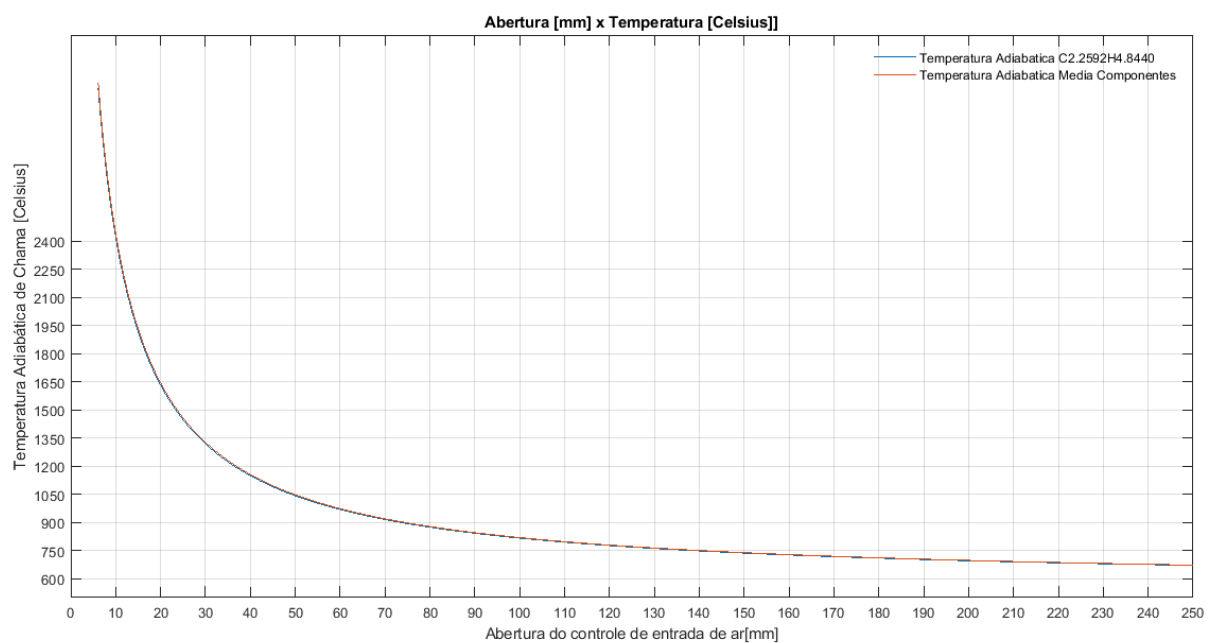


Figura 42 – Modelo 11 (tabela 6) - Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade

A.2 Modelo 12

A.2.1 Razão Mistura e Temperatura Adiabática de Chama em função da abertura

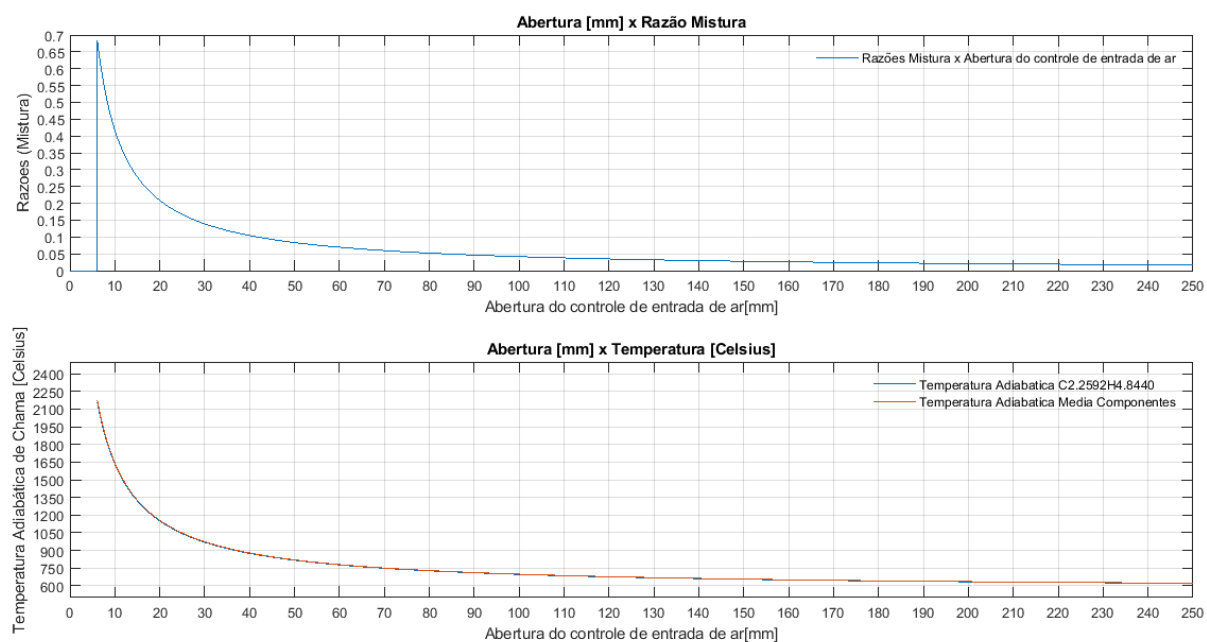


Figura 43 – Modelo 12 (Tabela 6) - Controle Temperatura - Abertura e Razões Equivalentes

A.2.2 Quantidade de Calor

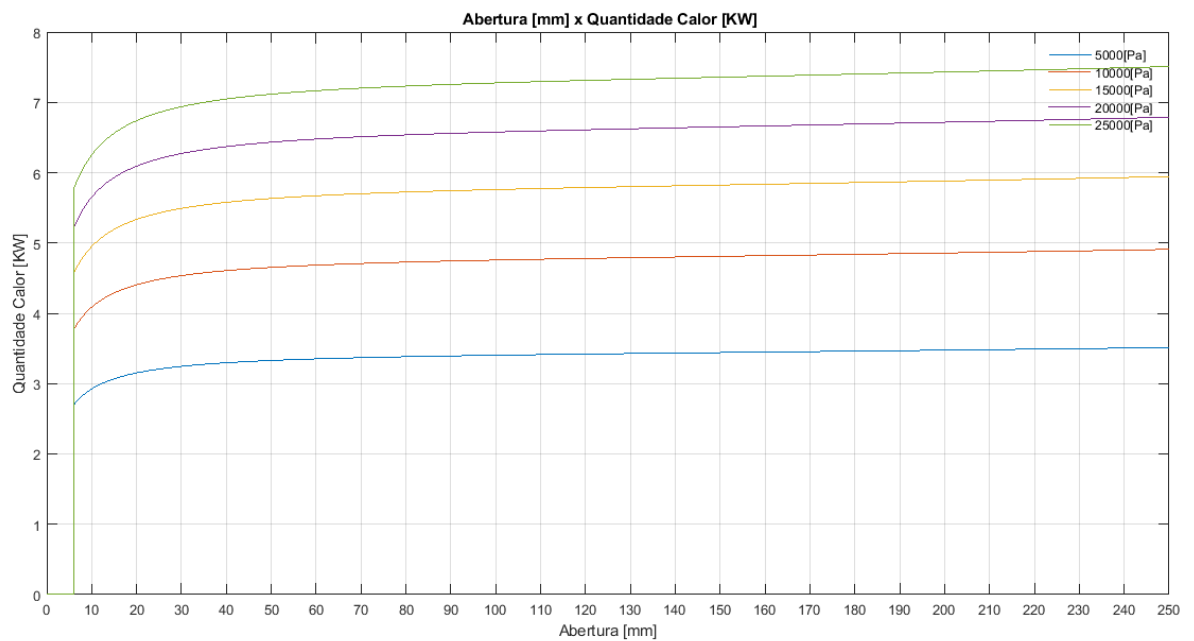


Figura 44 – Modelo 12 (Tabela 6) - Quantidade de Calor

A.2.3 Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade

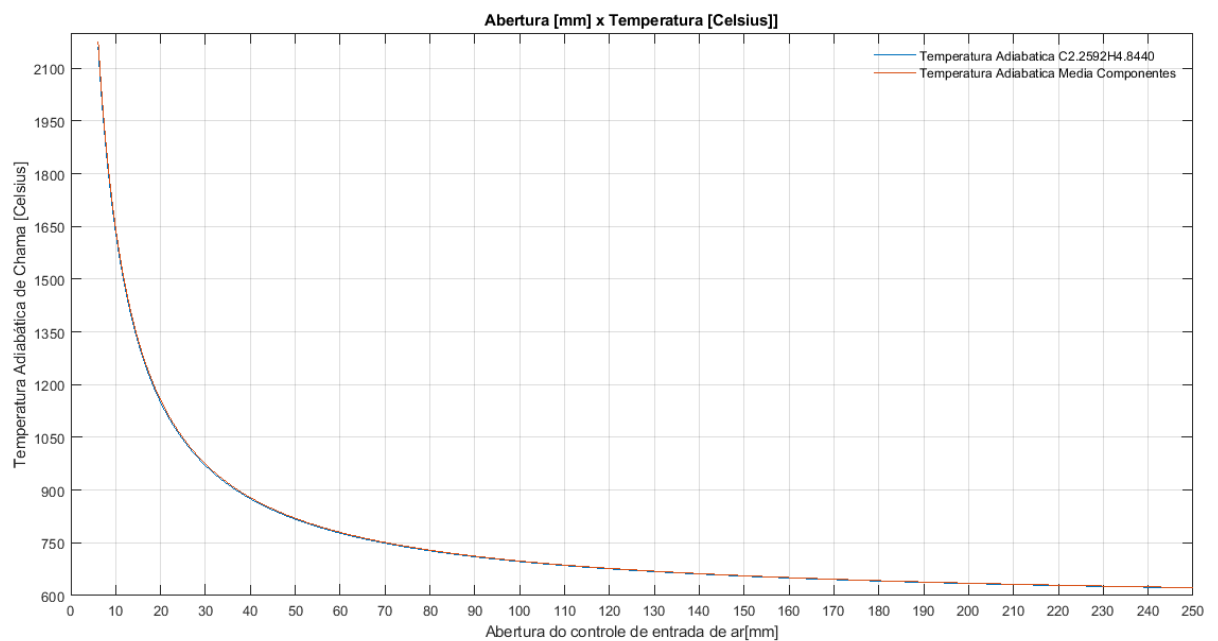


Figura 45 – Modelo 12 (tabela 6) - Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade

A.3 Modelo 13

A.3.1 Razão Mistura e Temperatura Adiabática de Chama em função da abertura

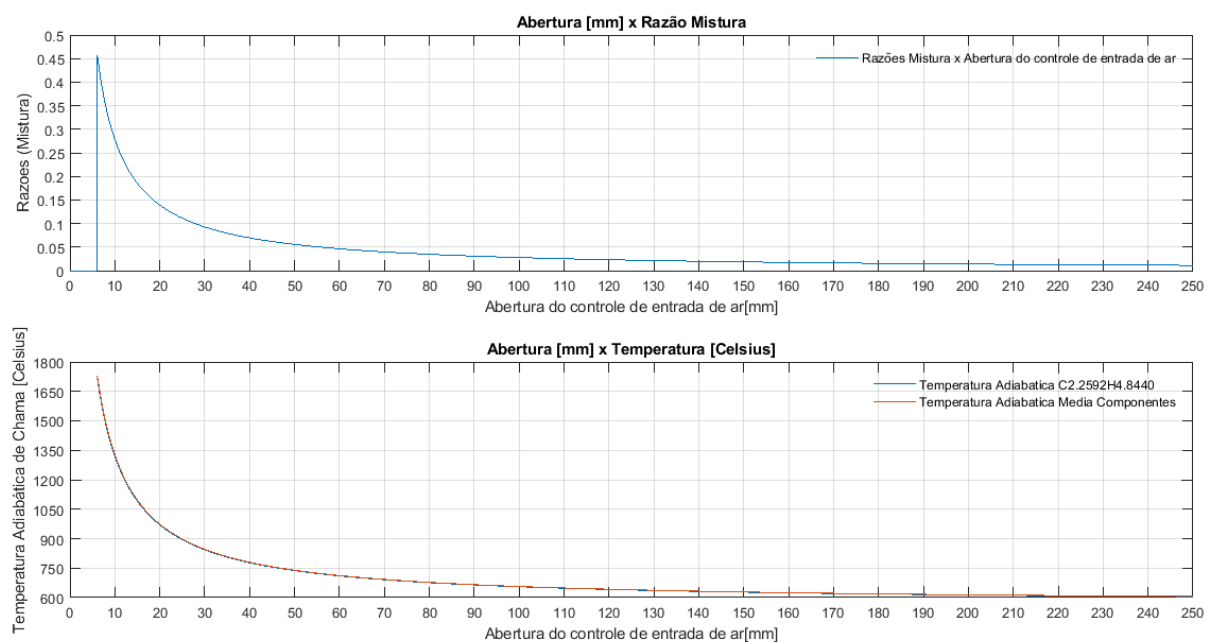


Figura 46 – Modelo 13 (Tabela 6) - Controle Temperatura - Abertura e Razões Equivalentes

A.3.2 Quantidade de Calor

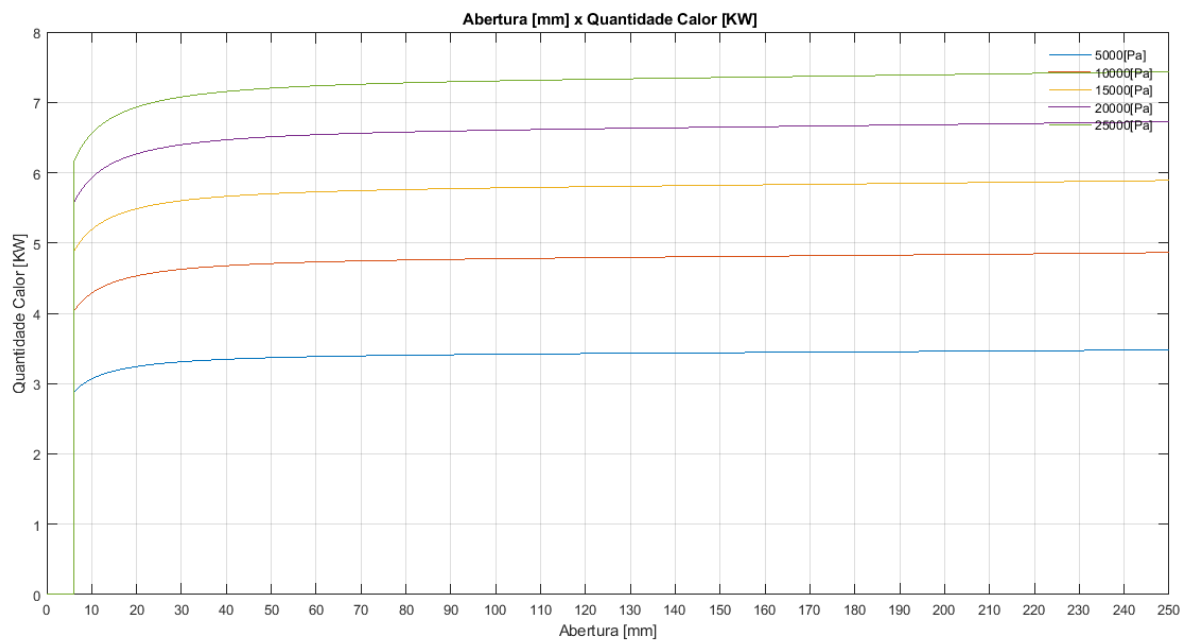


Figura 47 – Modelo 13 (Tabela 6) - Quantidade de Calor

A.3.3 Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade

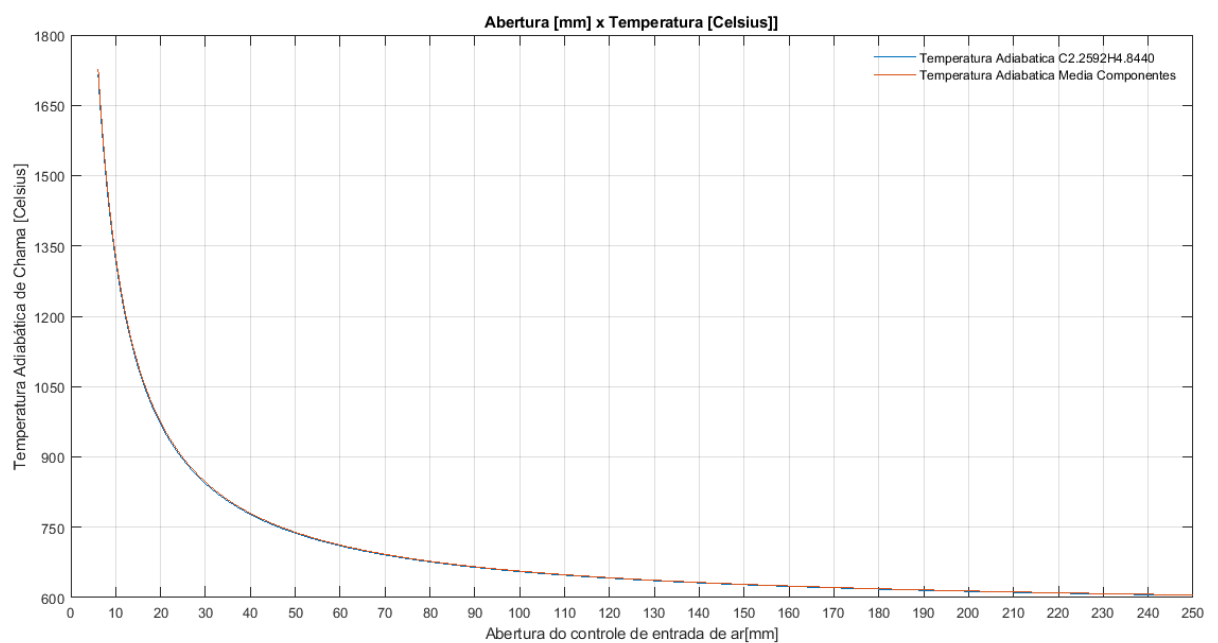


Figura 48 – Modelo 13 (tabela 6) - Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade

A.4 Modelo 14

A.4.1 Razão Mistura e Temperatura Adiabática de Chama em função da abertura

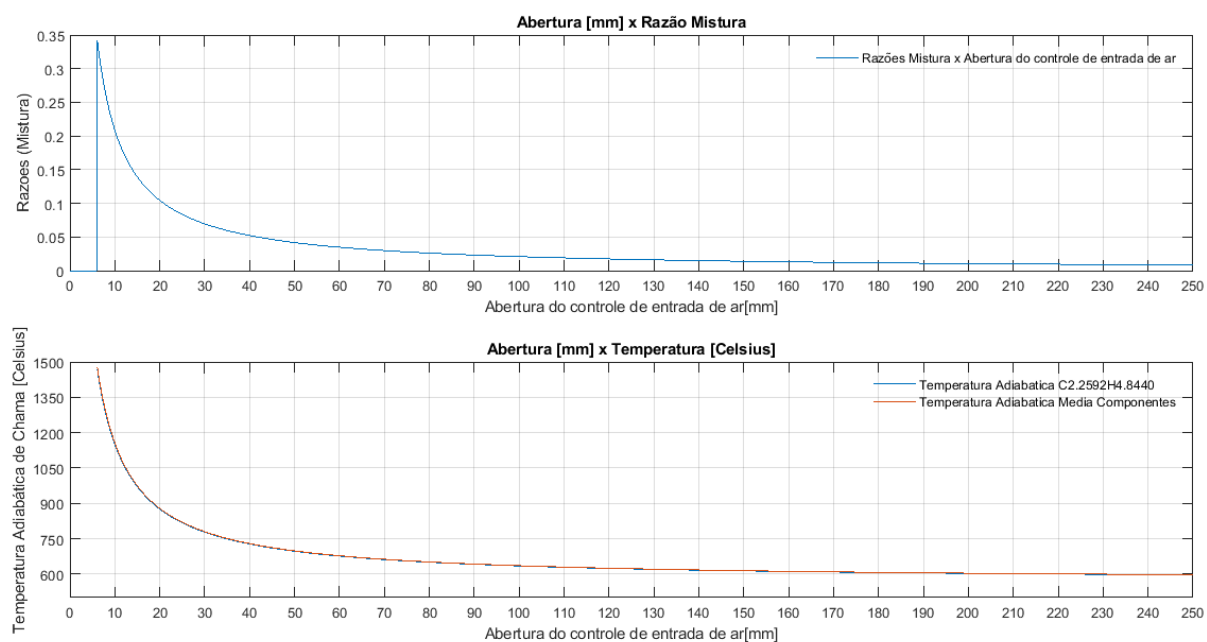


Figura 49 – Modelo 14 (Tabela 6) - Controle Temperatura - Abertura e Razões Equivalentes

A.4.2 Quantidade de Calor

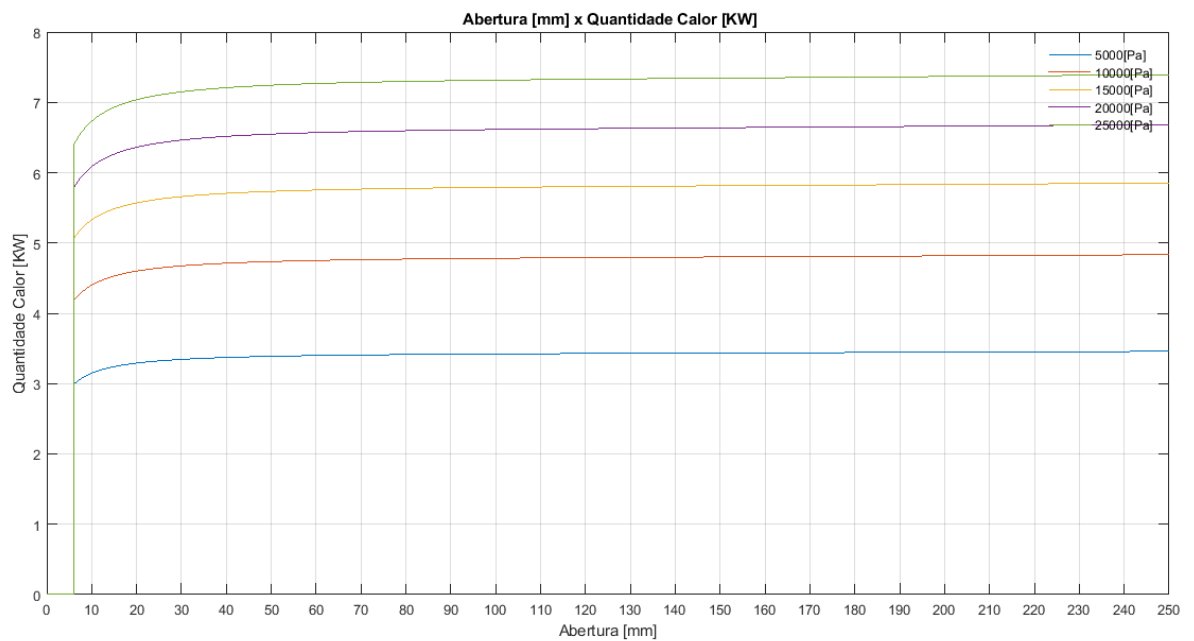


Figura 50 – Modelo 14 (Tabela 6) - Quantidade de Calor

A.4.3 Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade

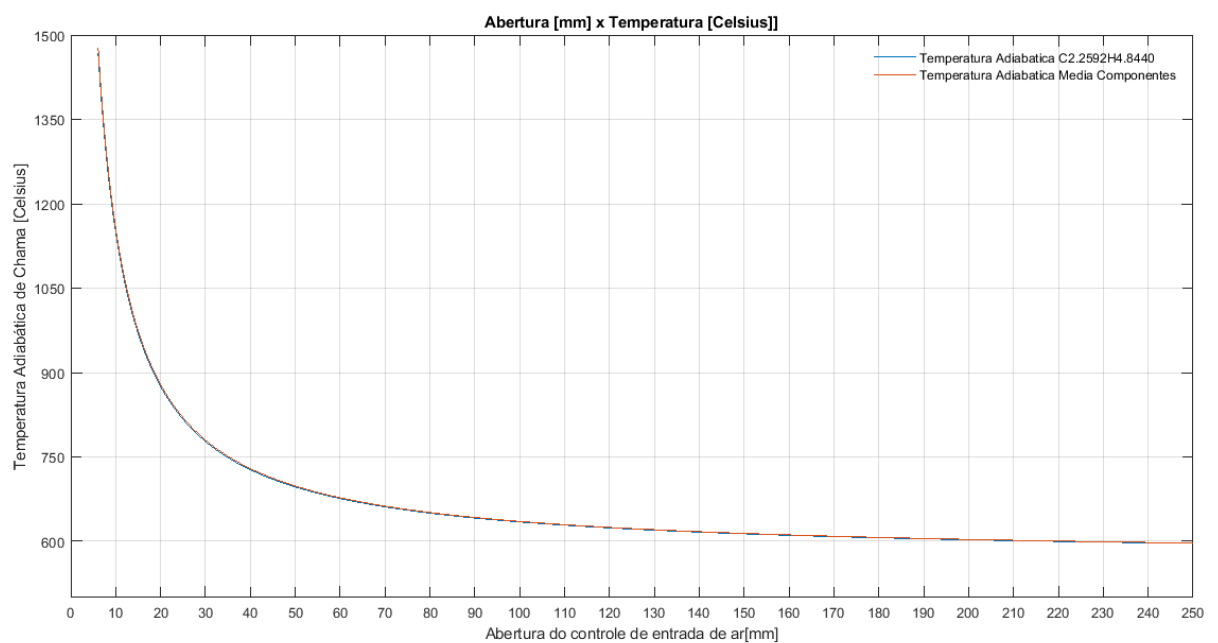


Figura 51 – Modelo 14 (tabela 6) - Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade

A.5 Modelo 15

A.5.1 Razão Mistura e Temperatura Adiabática de Chama em função da abertura

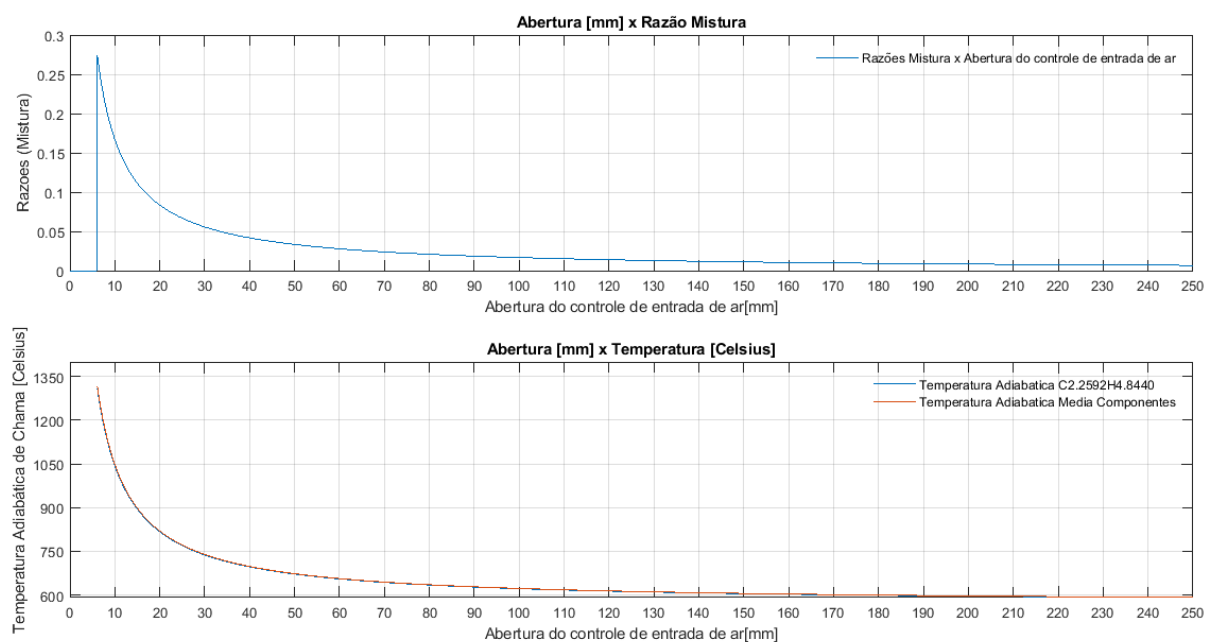


Figura 52 – Modelo 15 (Tabela 6) - Controle Temperatura - Abertura e Razões Equivalentes

A.5.2 Quantidade de Calor

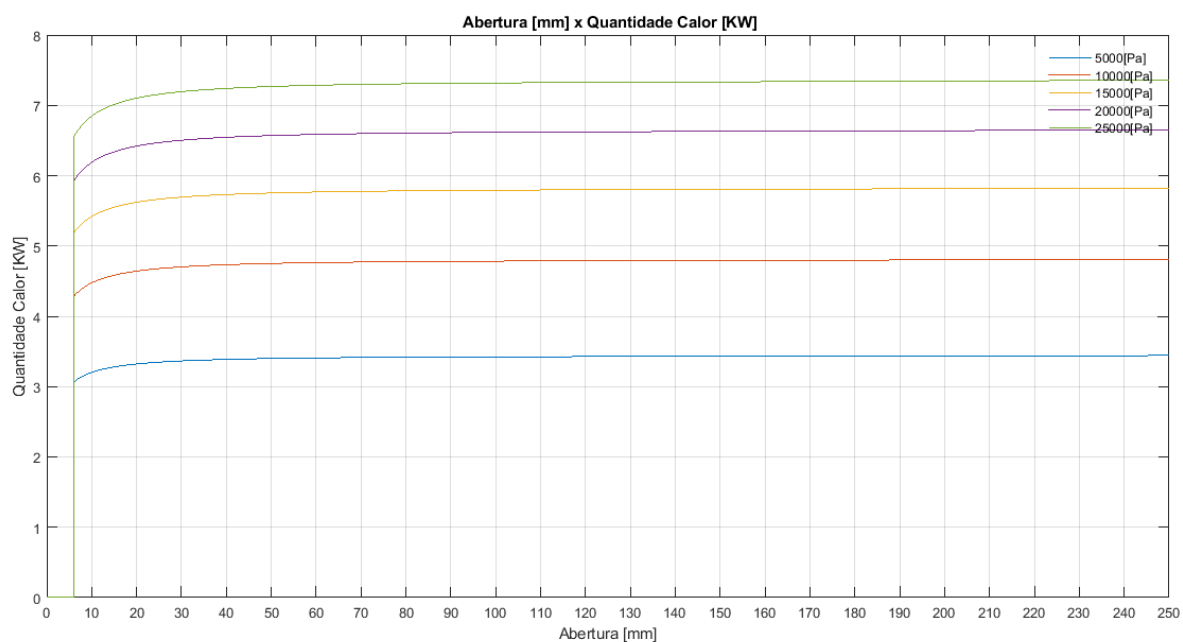


Figura 53 – Modelo 15 (Tabela 6) - Quantidade de Calor

A.5.3 Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade

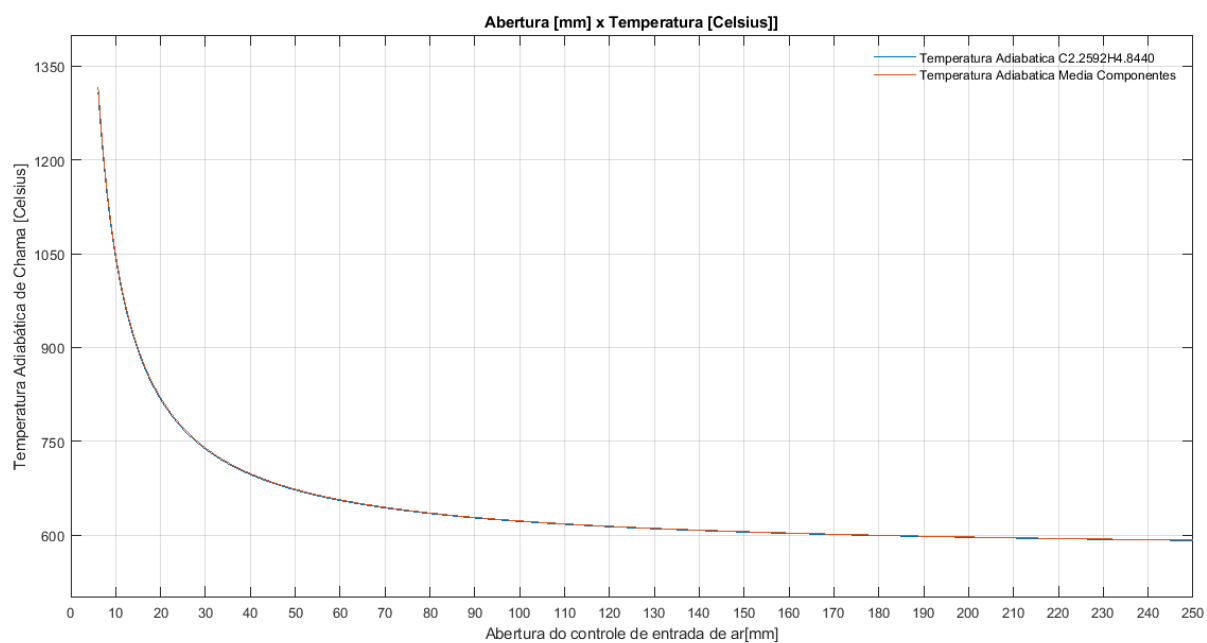


Figura 54 – Modelo 15 (tabela 6) - Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade

A.6 Modelo 16

A.6.1 Razão Mistura e Temperatura Adiabática de Chama em função da abertura

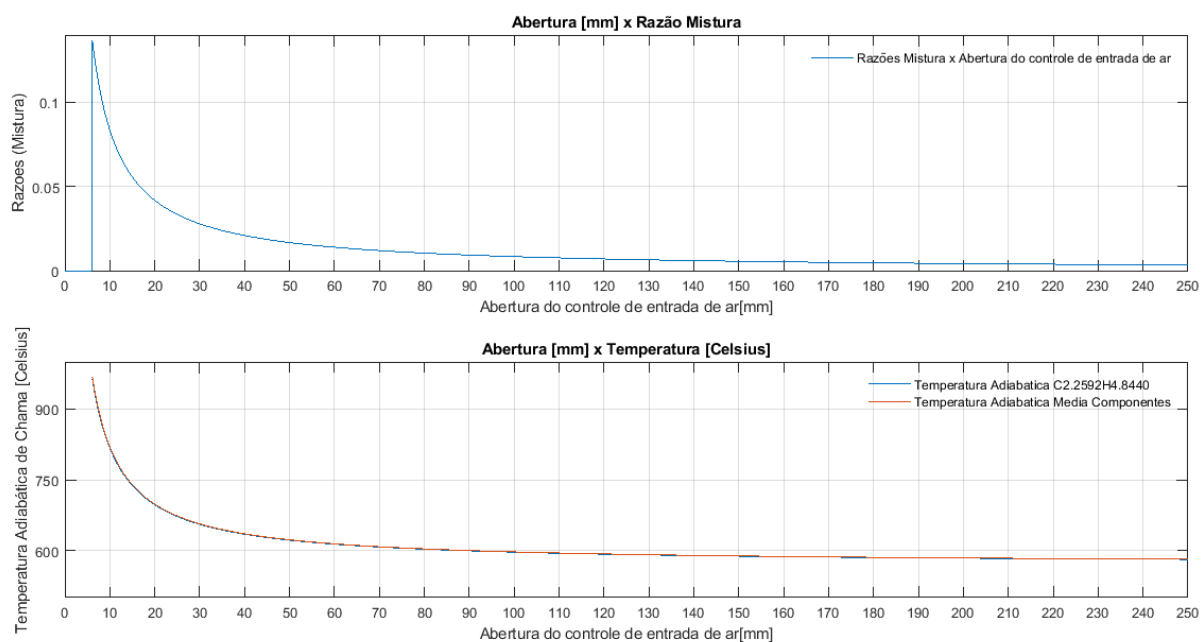


Figura 55 – Modelo 16 (Tabela 6) - Controle Temperatura - Abertura e Razões Equivalentes

A.6.2 Quantidade de Calor

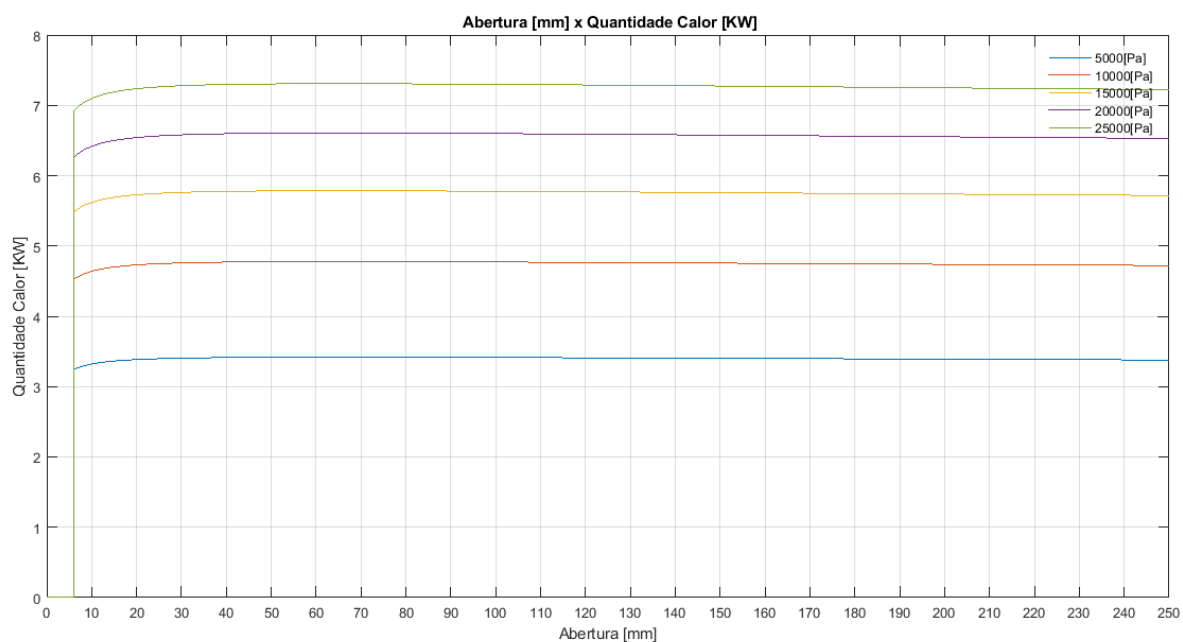


Figura 56 – Modelo 16 (Tabela 6) - Quantidade de Calor

A.6.3 Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade

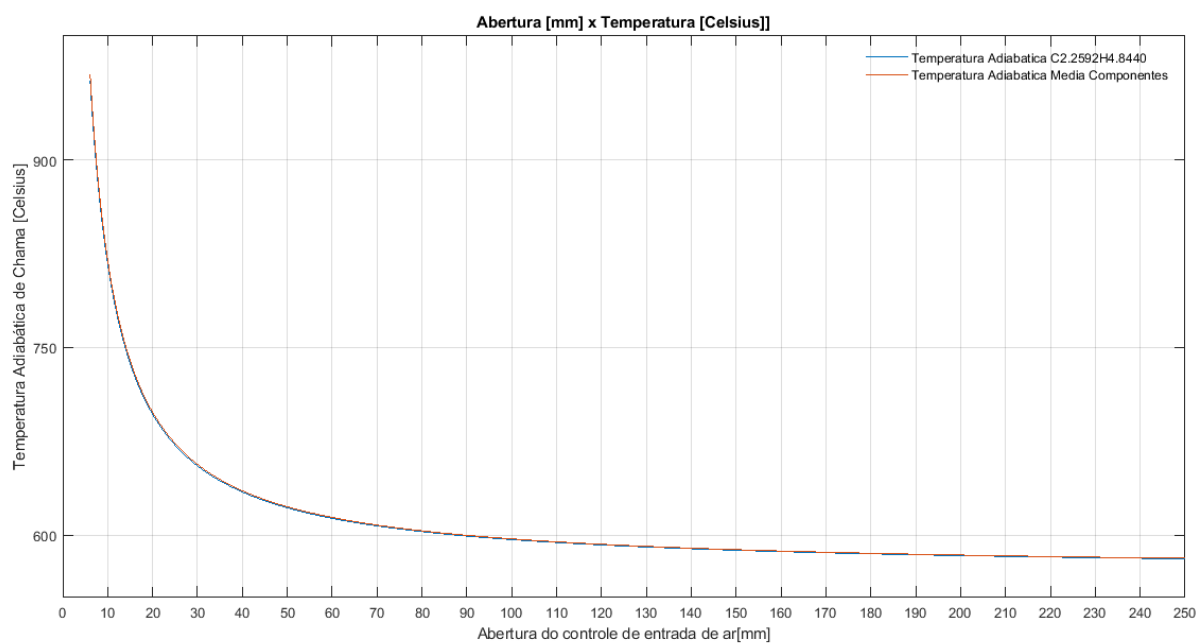


Figura 57 – Modelo 16 (tabela 6) - Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade

A.7 Modelo 17

A.7.1 Razão Mistura e Temperatura Adiabática de Chama em função da abertura

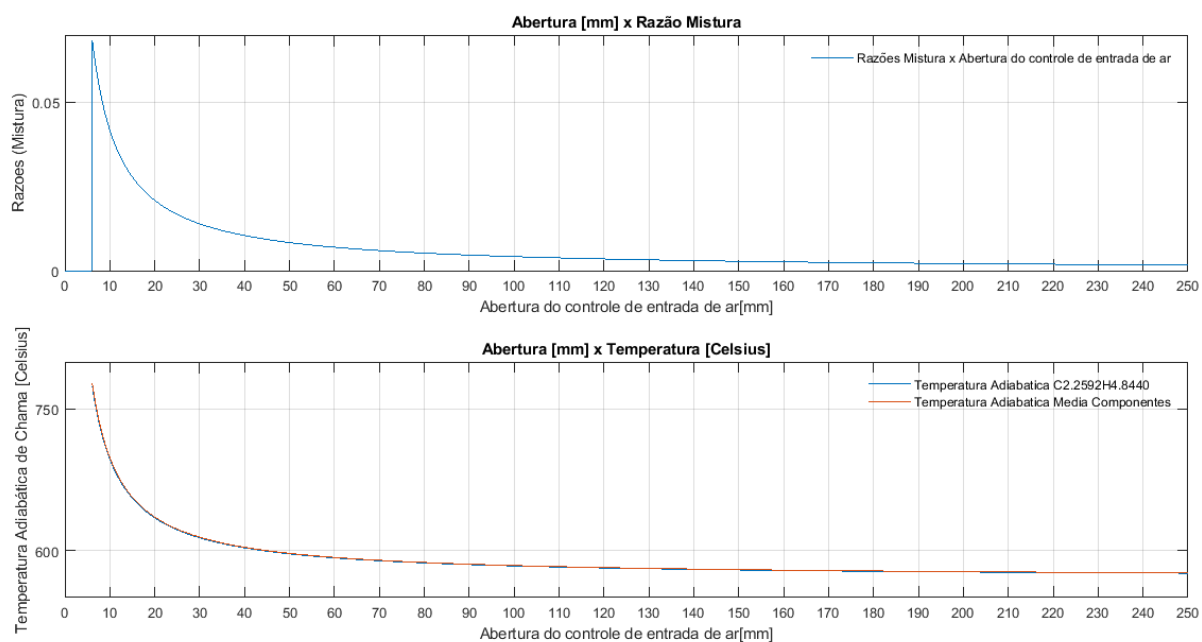


Figura 58 – Modelo 17 (Tabela 6) - Controle Temperatura - Abertura e Razões Equivalentes

A.7.2 Quantidade de Calor

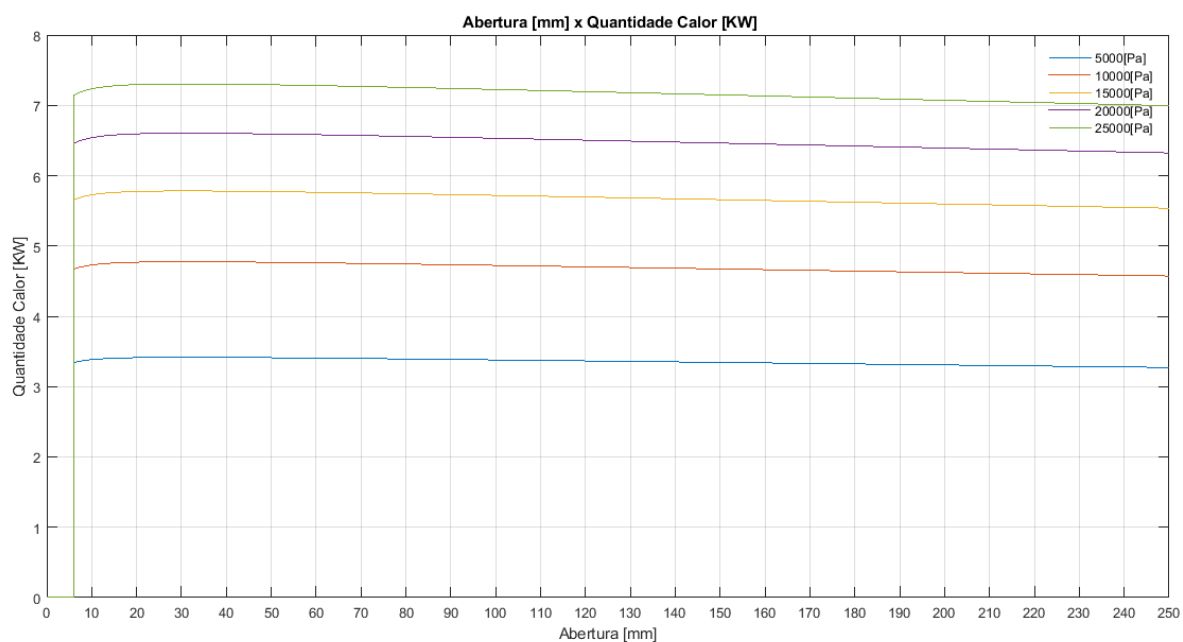


Figura 59 – Modelo 17 (Tabela 6) - Quantidade de Calor

A.7.3 Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade

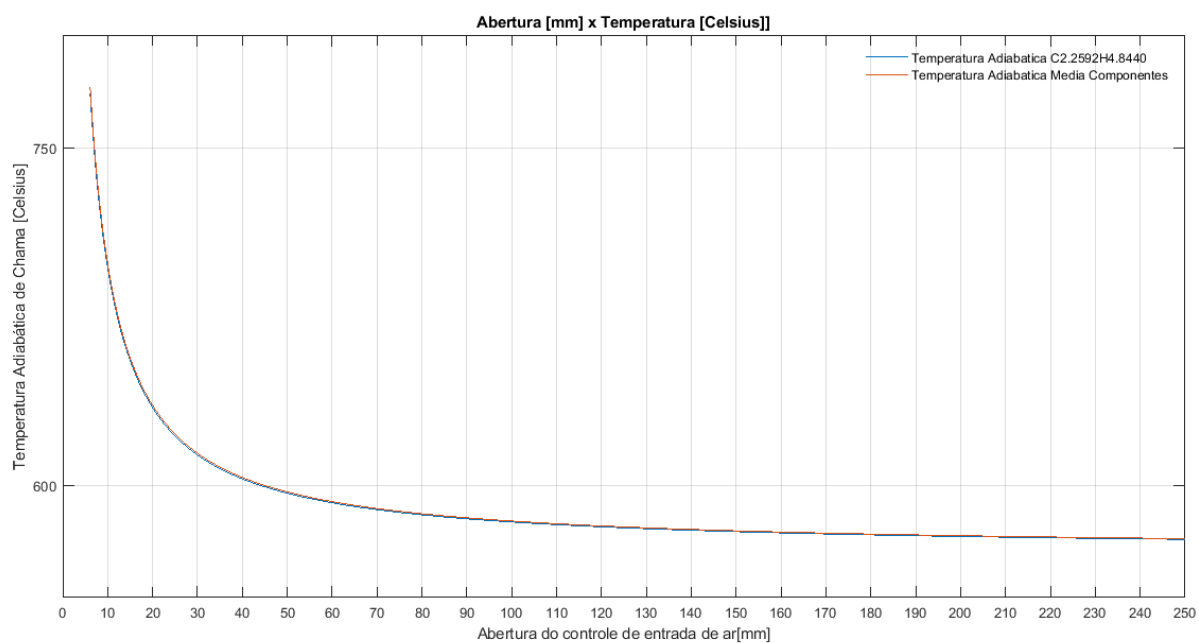


Figura 60 – Modelo 17 (tabela 6) - Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade

A.8 Modelo 18

A.8.1 Razão Mistura e Temperatura Adiabática de Chama em função da abertura

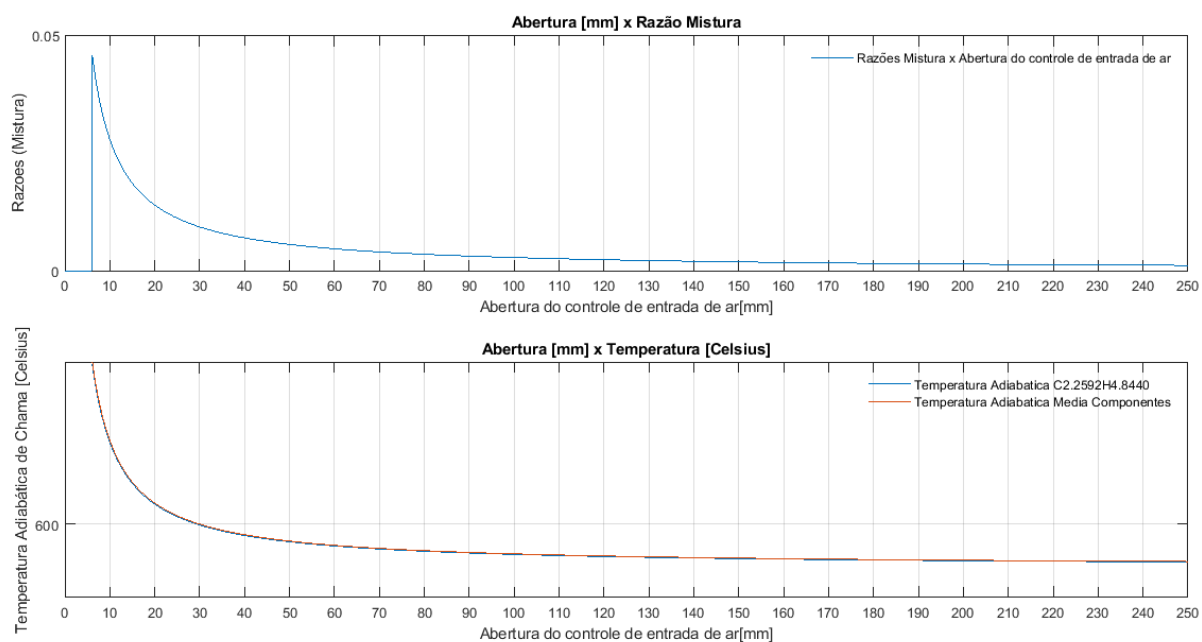


Figura 61 – Modelo 18 (Tabela 6) - Controle Temperatura - Abertura e Razões Equivalentes

A.8.2 Quantidade de Calor

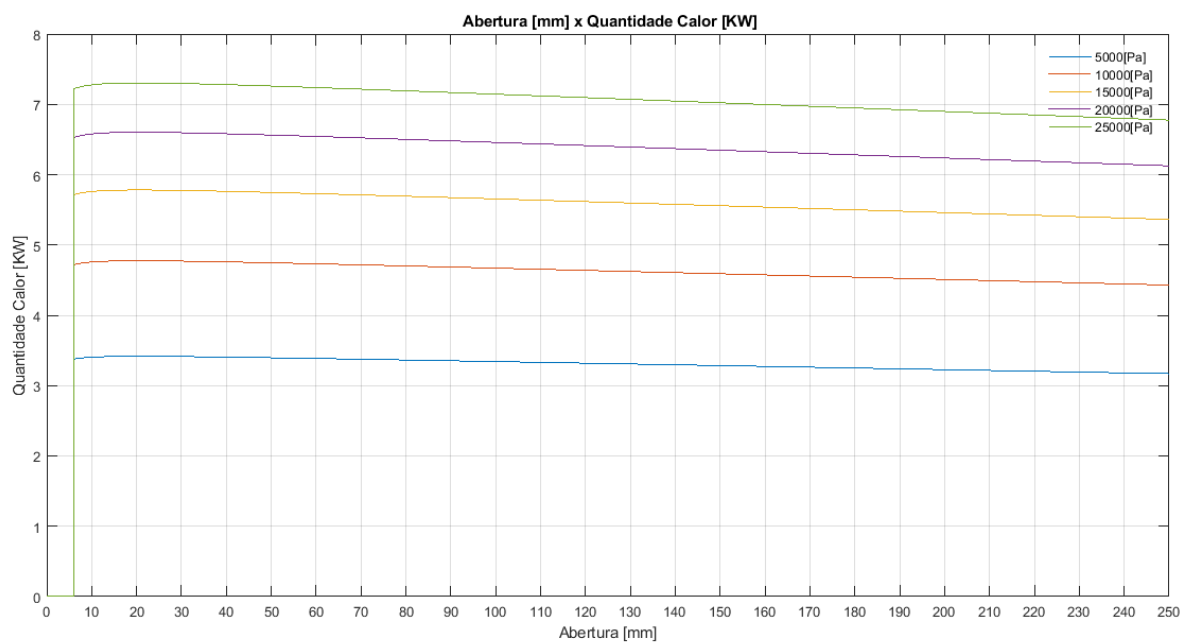


Figura 62 – Modelo 18 (Tabela 6) - Quantidade de Calor

A.8.3 Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade

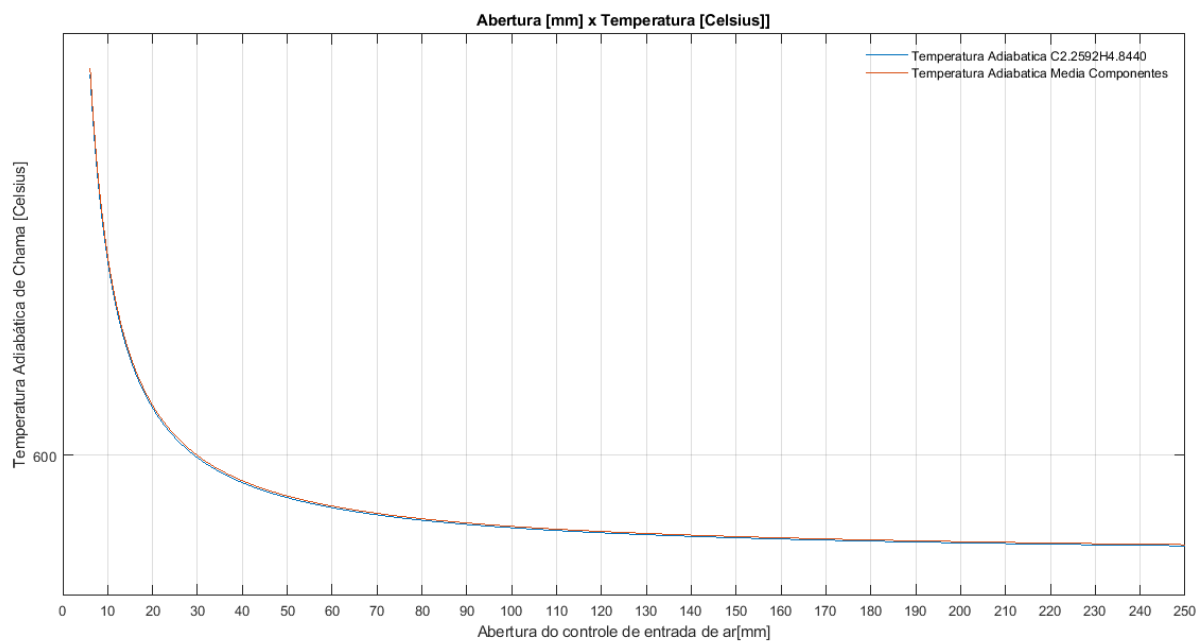


Figura 63 – Modelo 18 (tabela 6) - Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade

APÊNDICE B – Resultados em função da Razão do Bocal

Gráficos e resultados em função da do bocal (seção 3.2.2).

Os resultados para fluxo mássico primário não estão em função da abertura e bocal, portanto são os mesmos para todos os modelos propostos nos apêndices A e B.

B.1 Modelo 21

B.1.1 Razão Mistura e Temperatura Adiabática de Chama em função da abertura

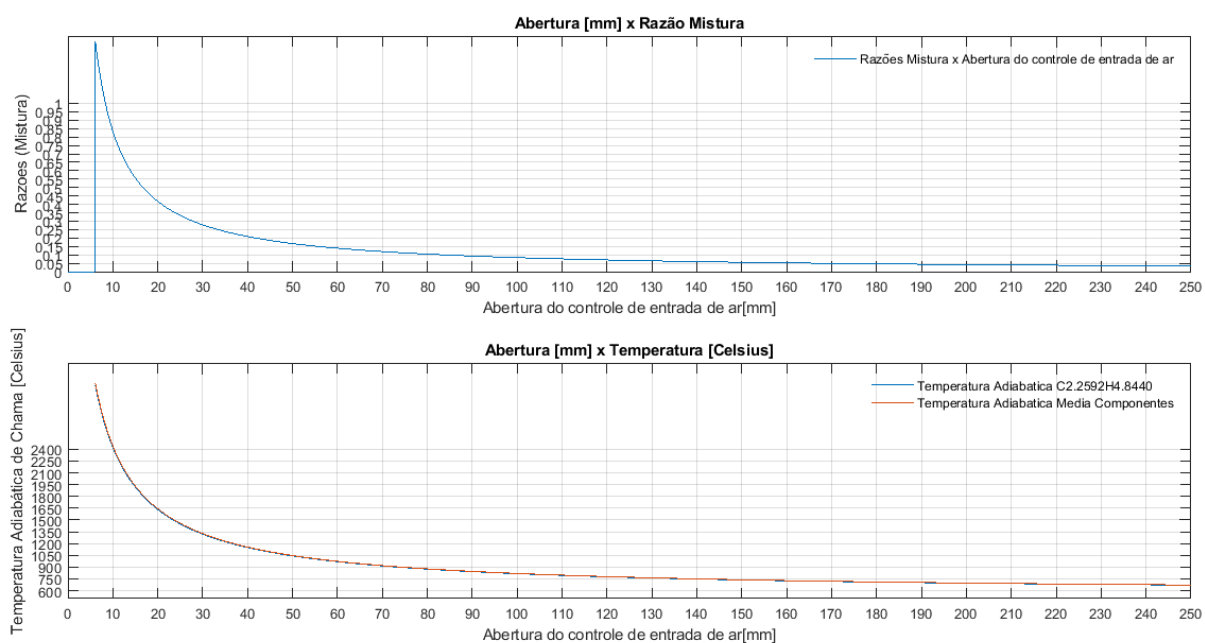


Figura 64 – Modelo 21 (tabela 6) - Controle Temperatura - Abertura e Razões Equivalentes

B.1.2 Quantidade de Calor

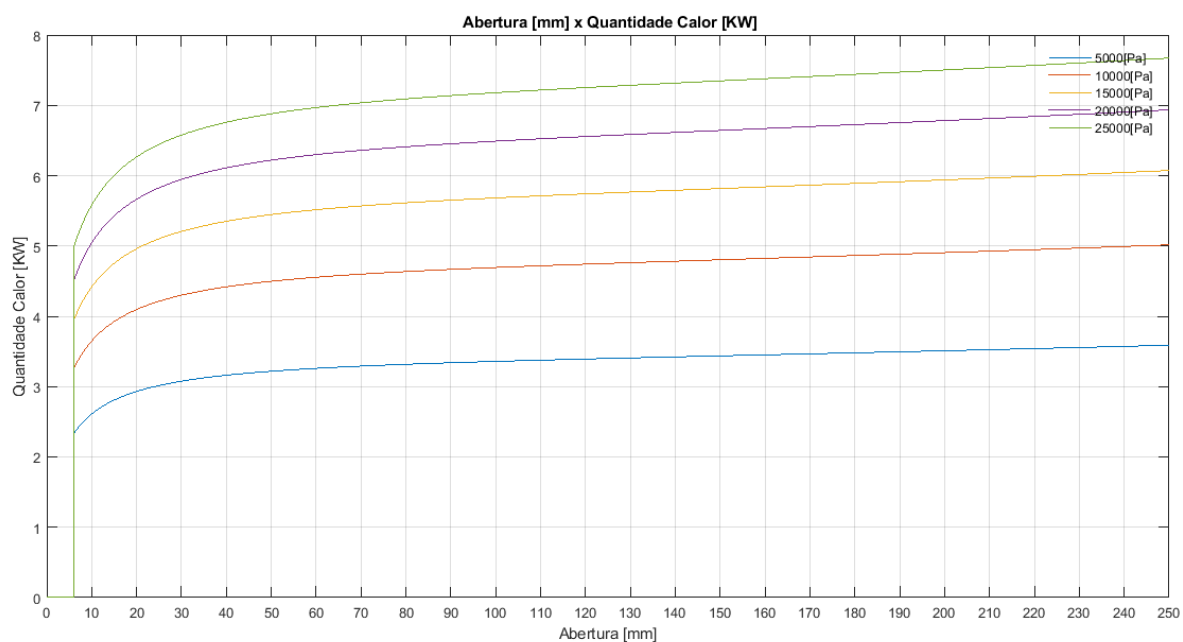


Figura 65 – Modelo 21 (tabela 6) - Quantidade de Calor

B.1.3 Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade

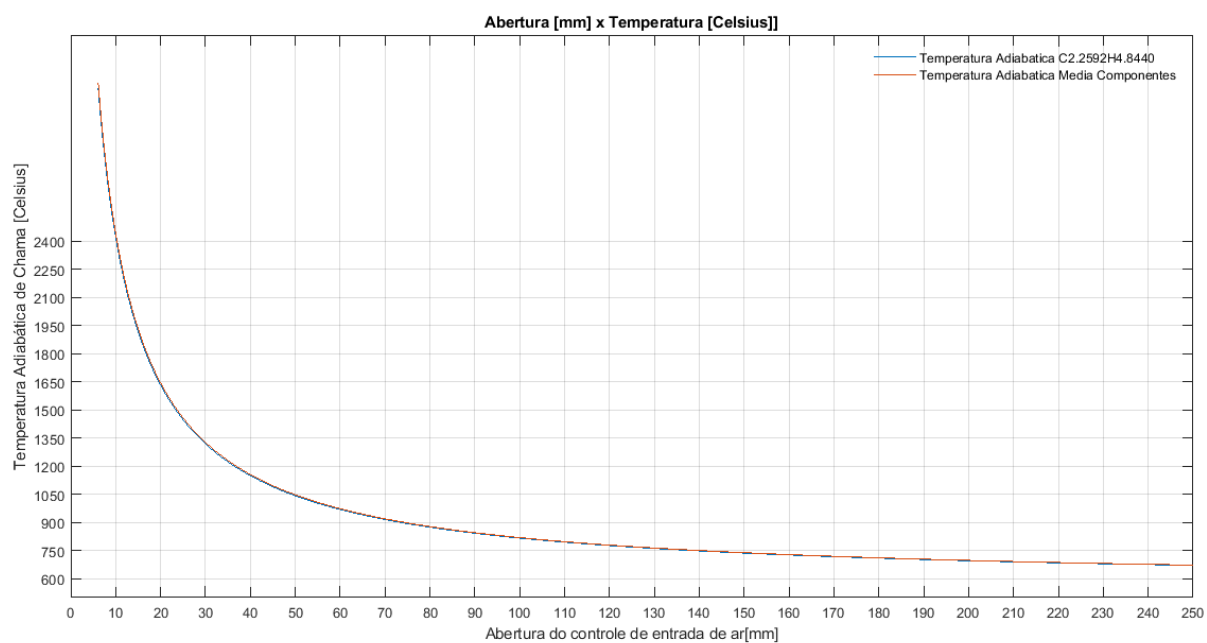


Figura 66 – Modelo 21 (tabela 6) - Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade

B.2 Modelo 22

B.2.1 Razão Mistura e Temperatura Adiabática de Chama em função da abertura

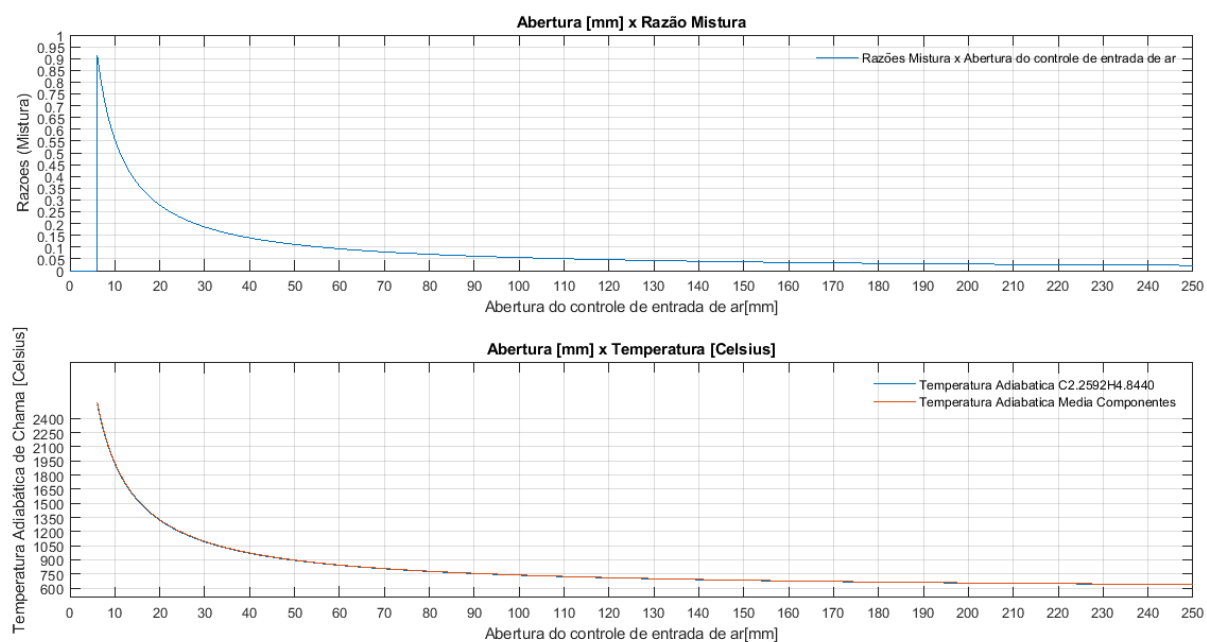


Figura 67 – Modelo 22 (Tabela 6) - Controle Temperatura - Abertura e Razões Equivalentes

B.2.2 Quantidade de Calor

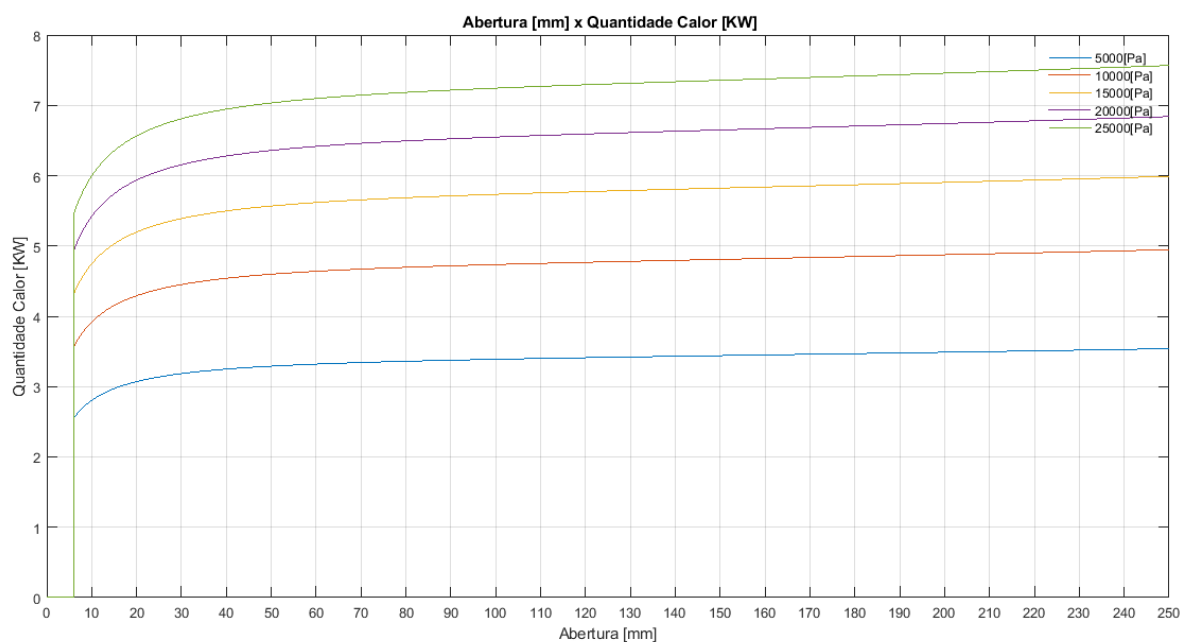


Figura 68 – Modelo 22 (Tabela 6) - Quantidade de Calor

B.2.3 Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade

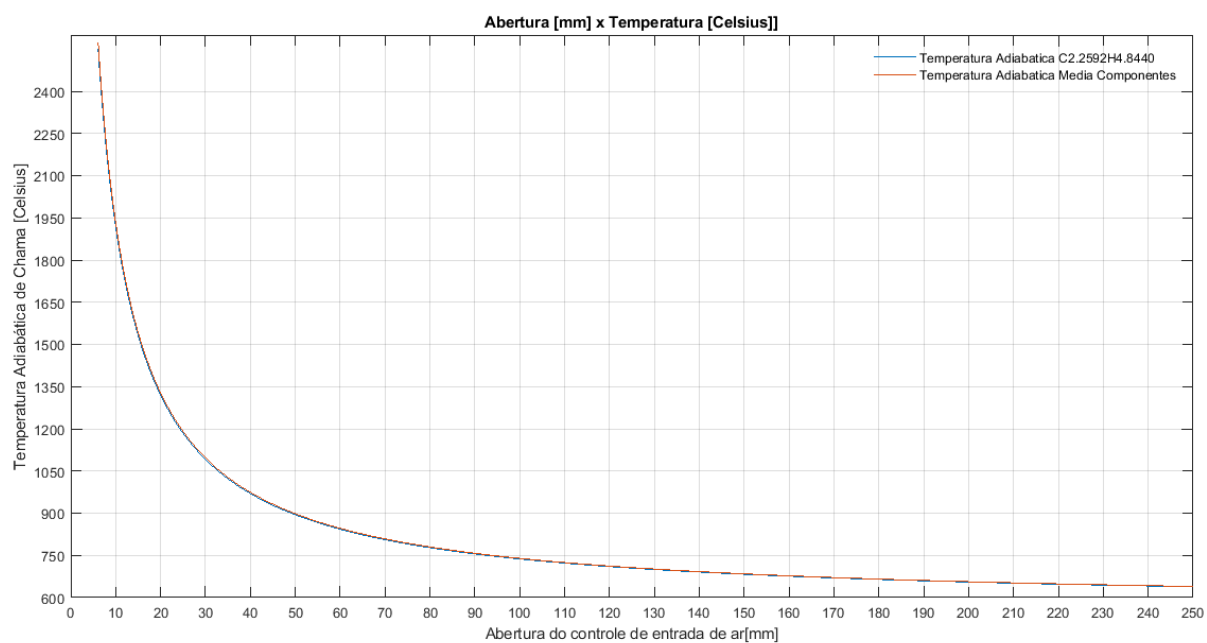


Figura 69 – Modelo 22 (tabela 6) - Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade

B.3 Modelo 23

B.3.1 Razão Mistura e Temperatura Adiabática de Chama em função da abertura

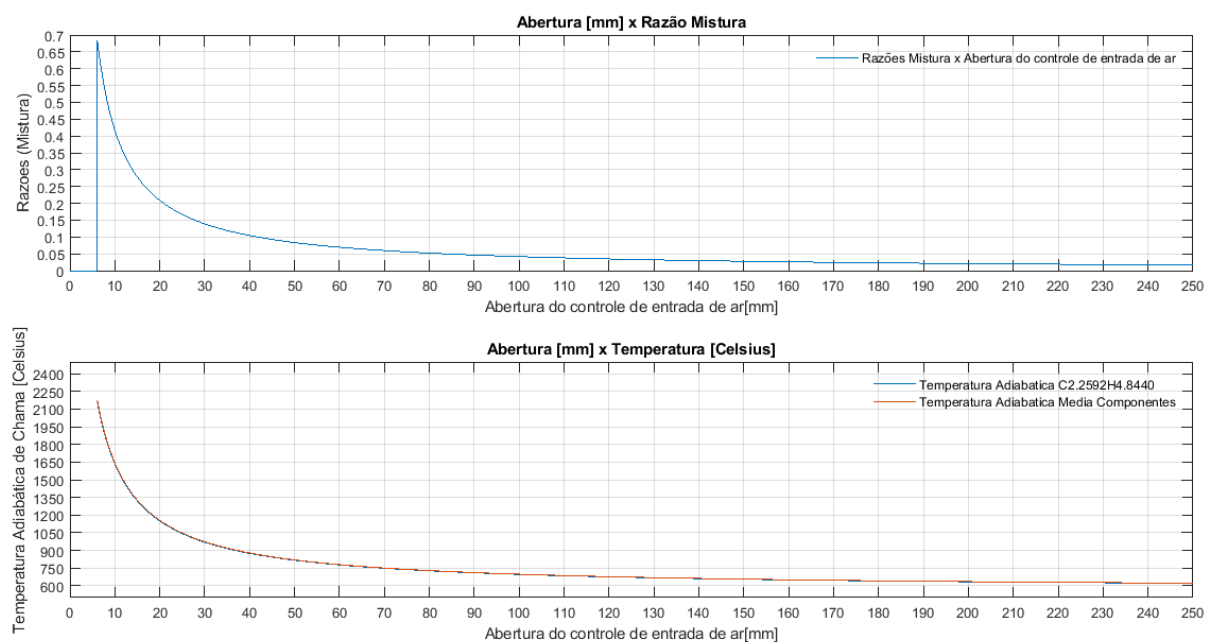


Figura 70 – Modelo 23 (Tabela 6) - Controle Temperatura - Abertura e Razões Equivalentes

B.3.2 Quantidade de Calor

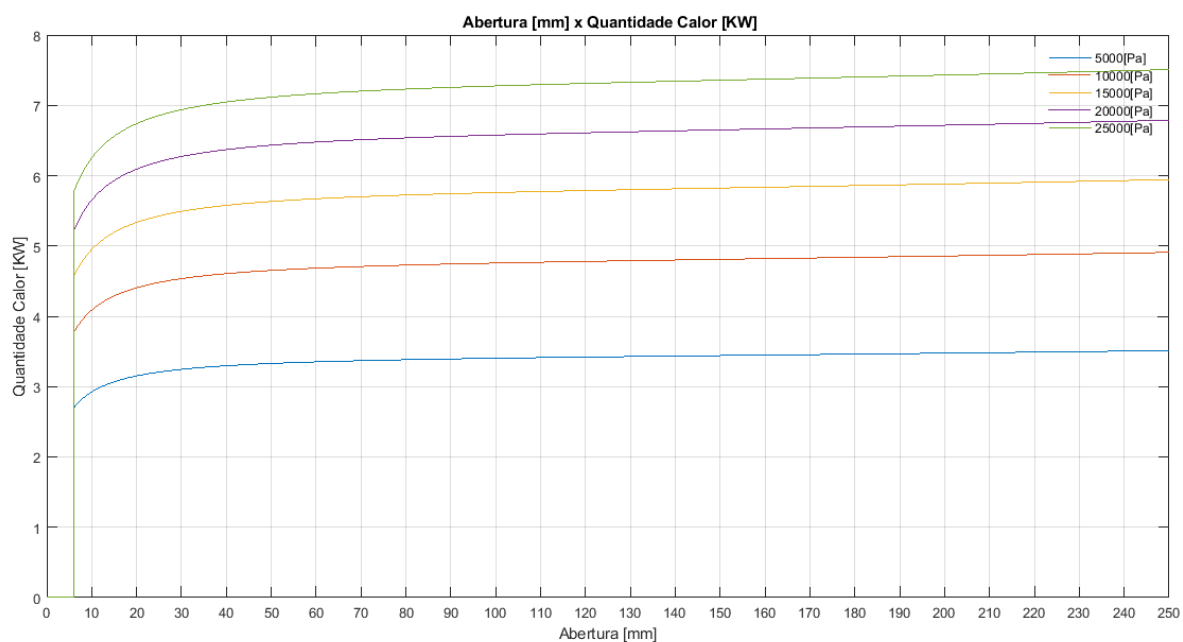


Figura 71 – Modelo 23 (Tabela 6) - Quantidade de Calor

B.3.3 Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade

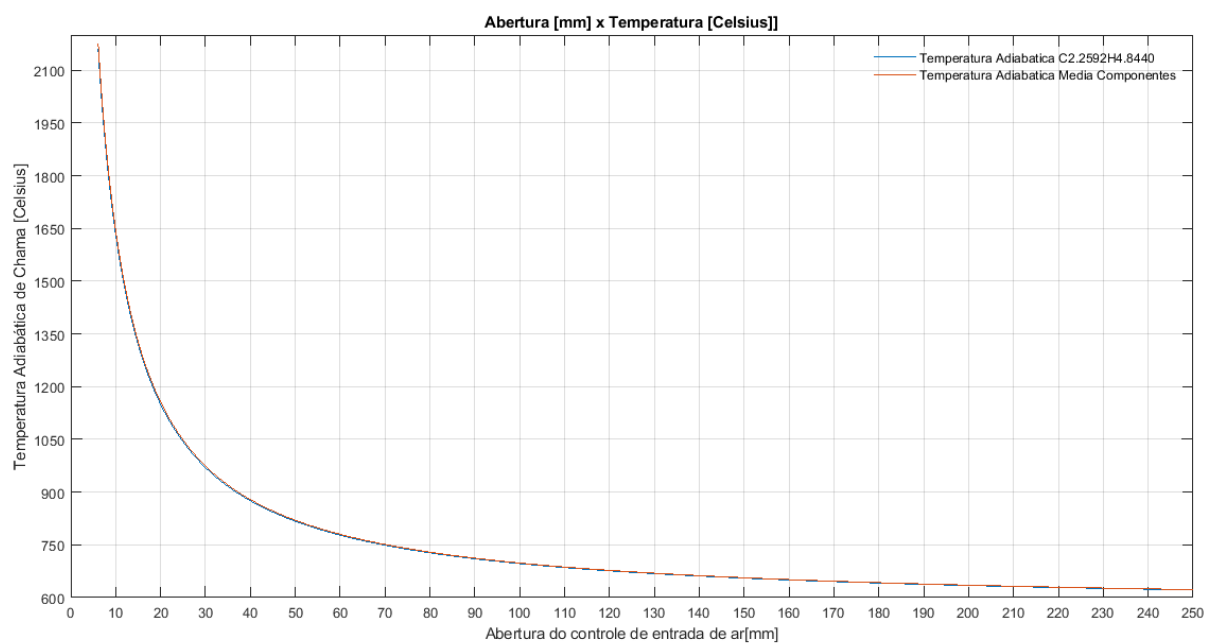


Figura 72 – Modelo 23 (tabela 6) - Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade

B.4 Modelo 24

B.4.1 Razão Mistura e Temperatura Adiabática de Chama em função da abertura

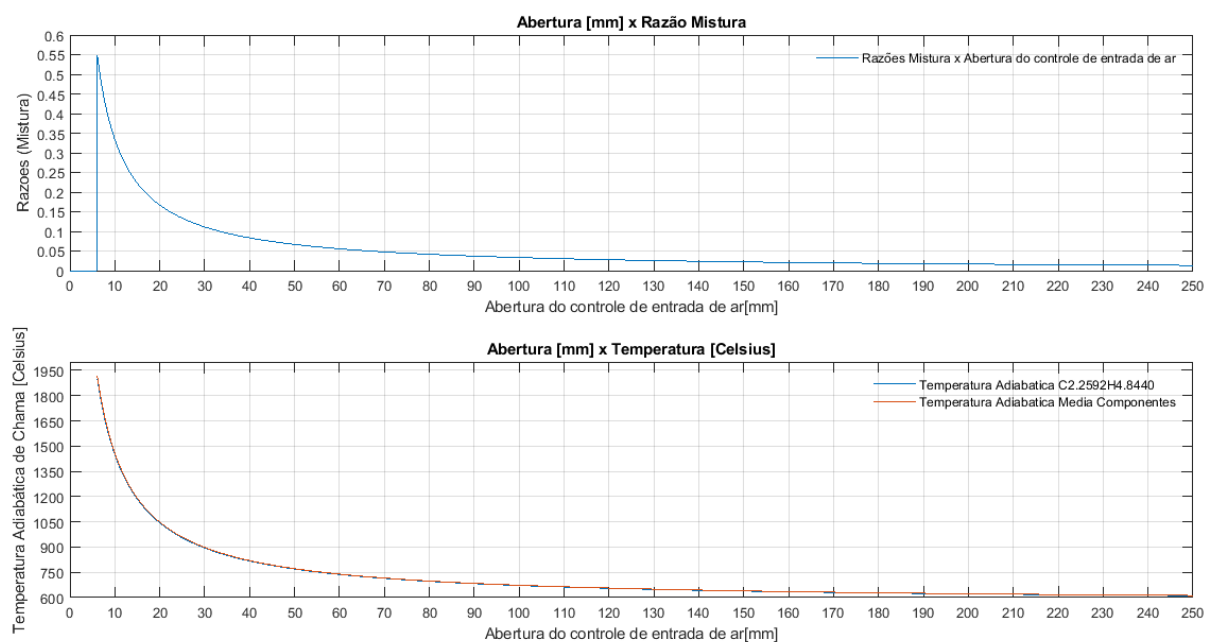


Figura 73 – Modelo 24 (Tabela 6) - Controle Temperatura - Abertura e Razões Equivalentes

B.4.2 Quantidade de Calor

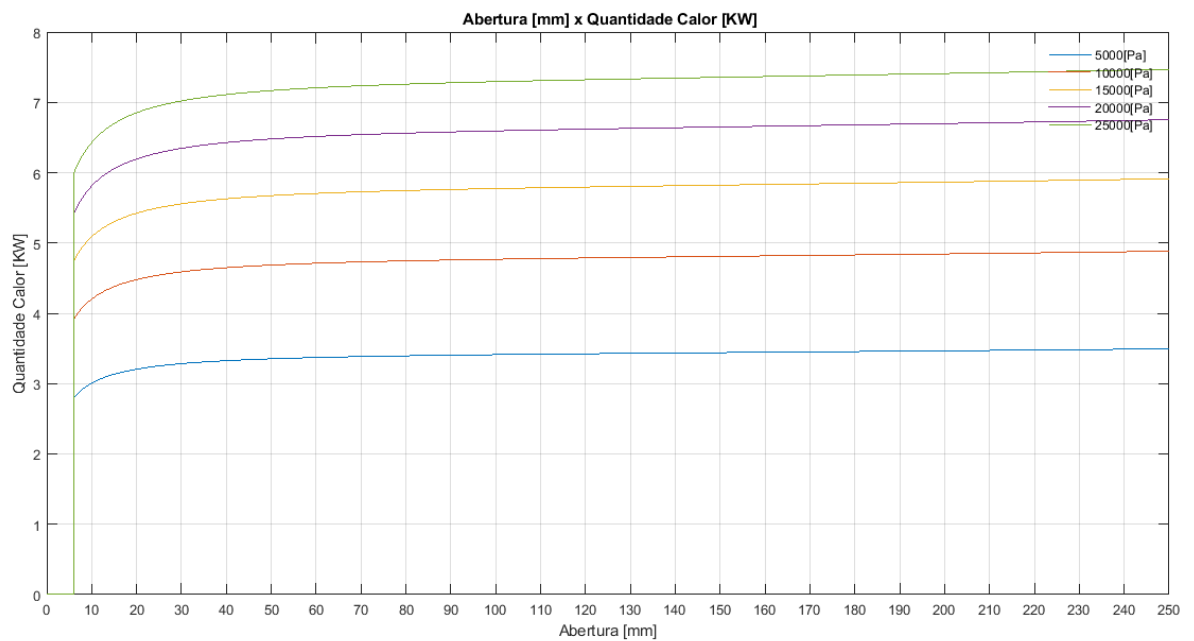


Figura 74 – Modelo 24 (Tabela 6) - Quantidade de Calor

B.4.3 Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade

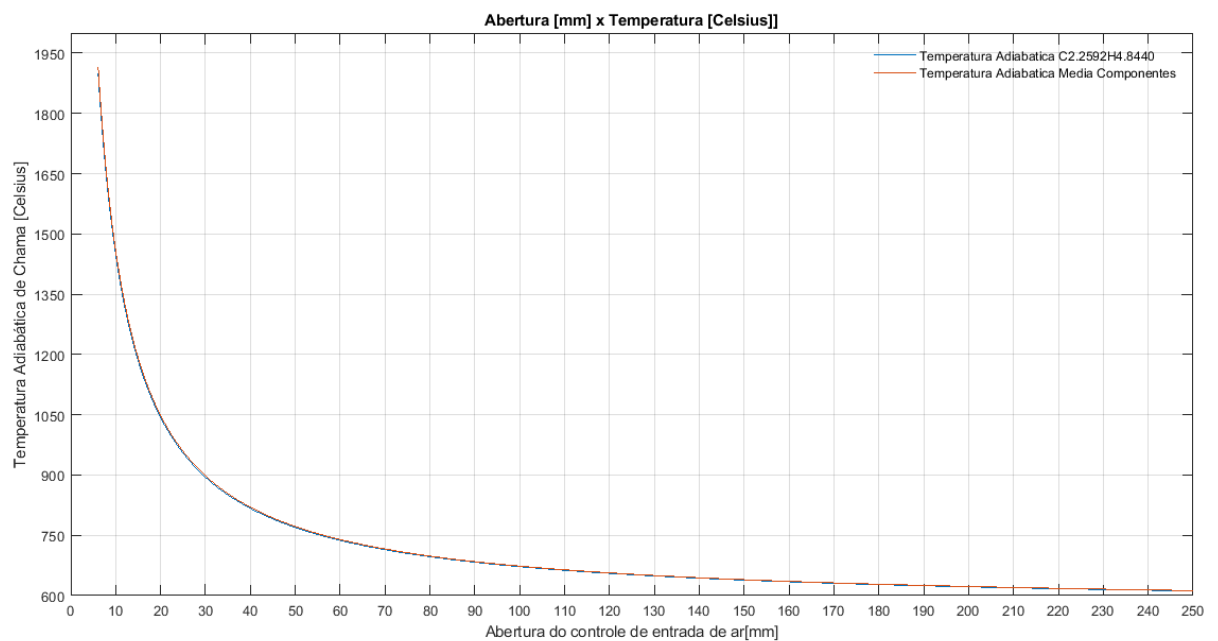


Figura 75 – Modelo 24 (tabela 6) - Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade

B.5 Modelo 25

B.5.1 Razão Mistura e Temperatura Adiabática de Chama em função da abertura

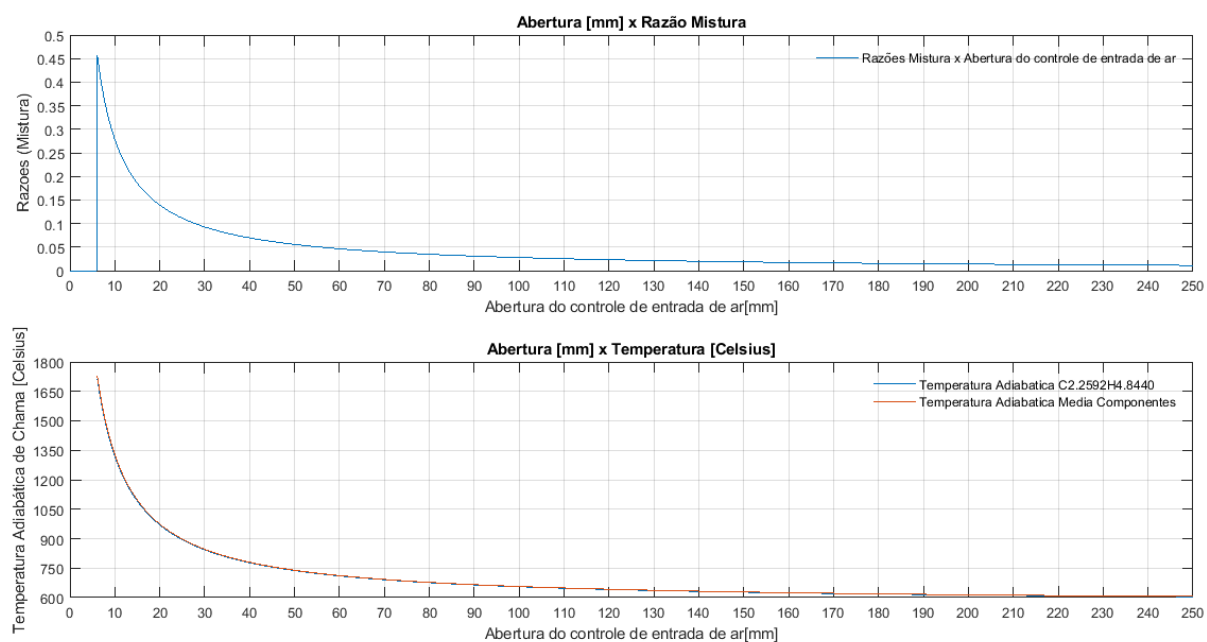


Figura 76 – Modelo 25 (Tabela 6) - Controle Temperatura - Abertura e Razões Equivalentes

B.5.2 Quantidade de Calor

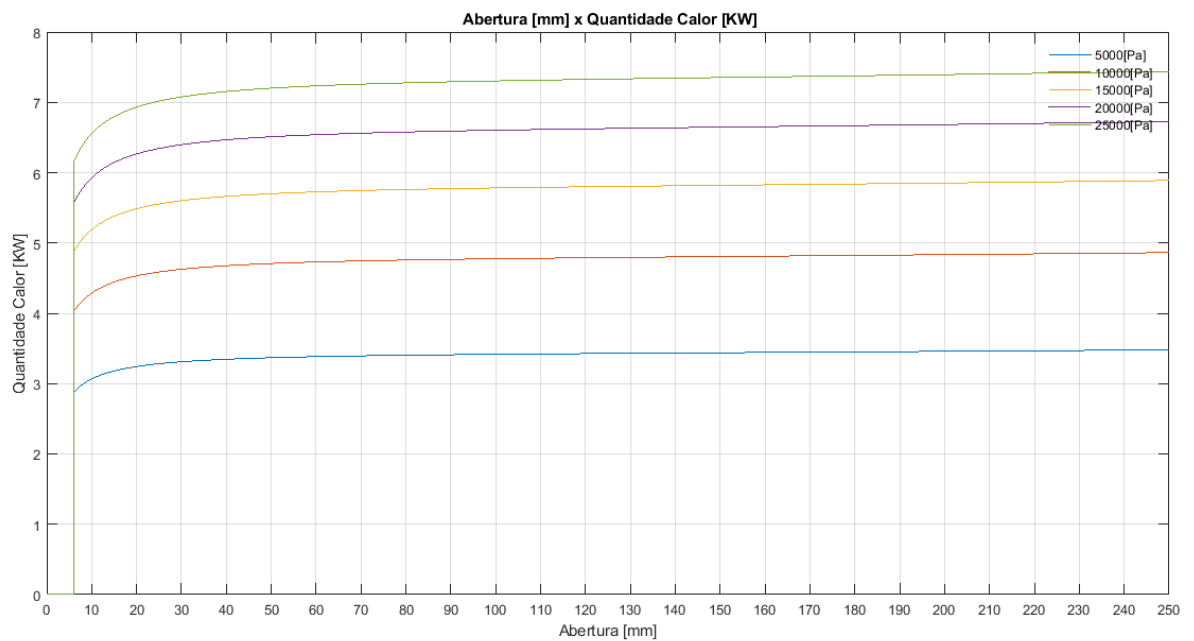


Figura 77 – Modelo 25 (Tabela 6) - Quantidade de Calor

B.5.3 Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade

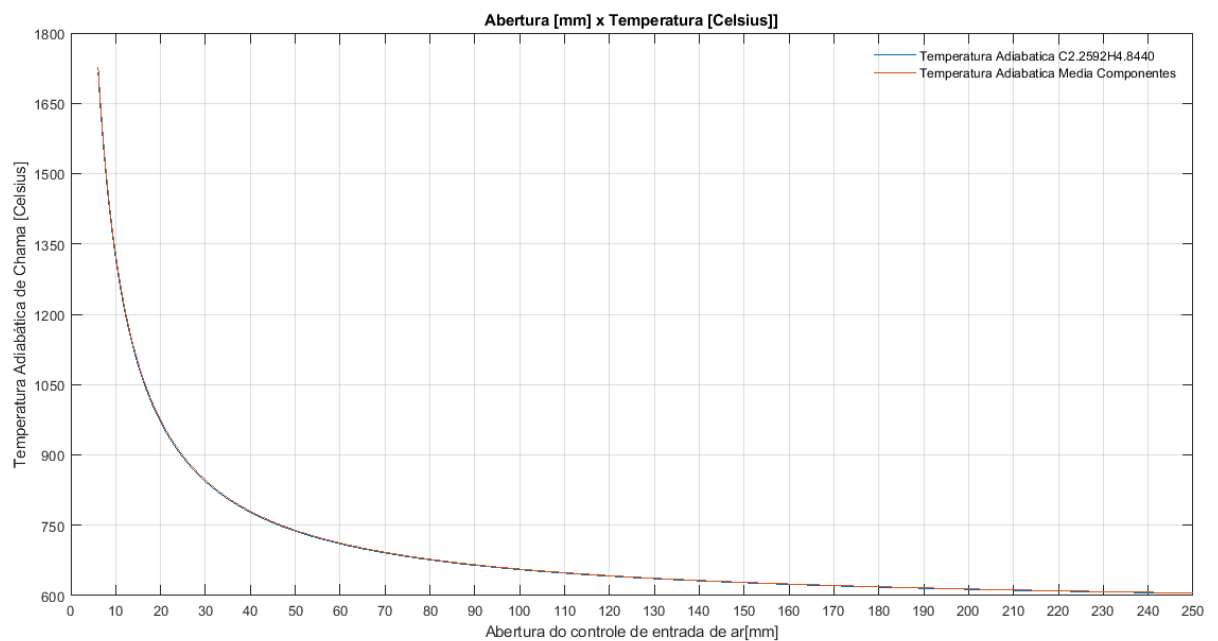


Figura 78 – Modelo 25 (tabela 6) - Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade

B.6 Modelo 26

B.6.1 Razão Mistura e Temperatura Adiabática de Chama em função da abertura

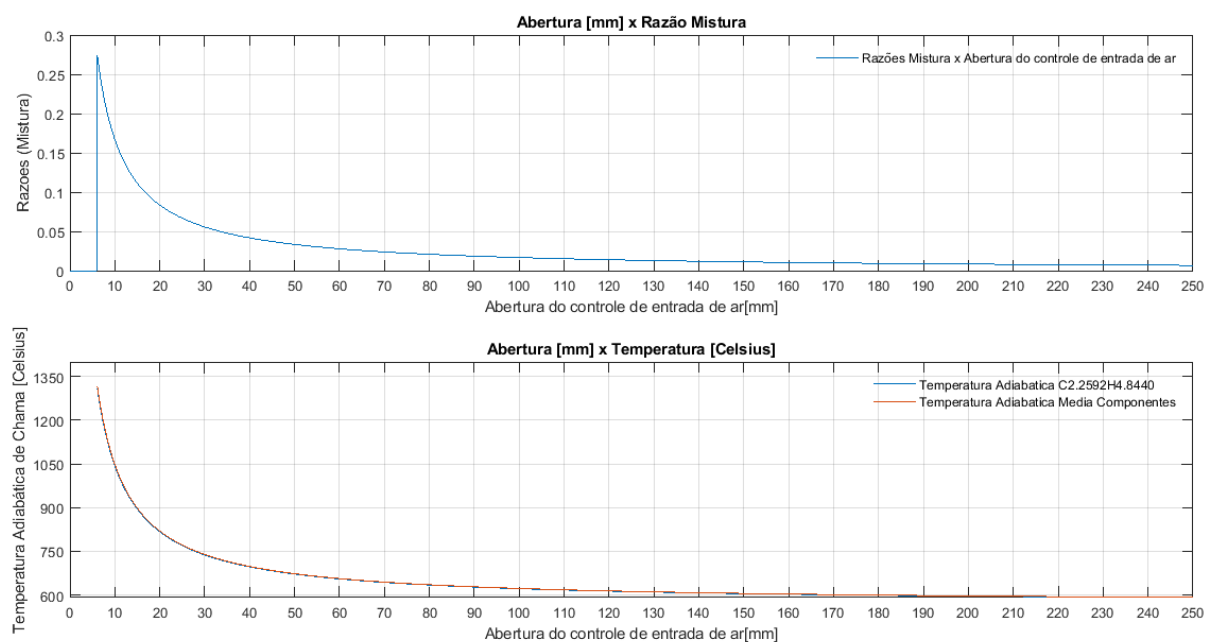


Figura 79 – Modelo 26 (Tabela 6) - Controle Temperatura - Abertura e Razões Equivalentes

B.6.2 Quantidade de Calor

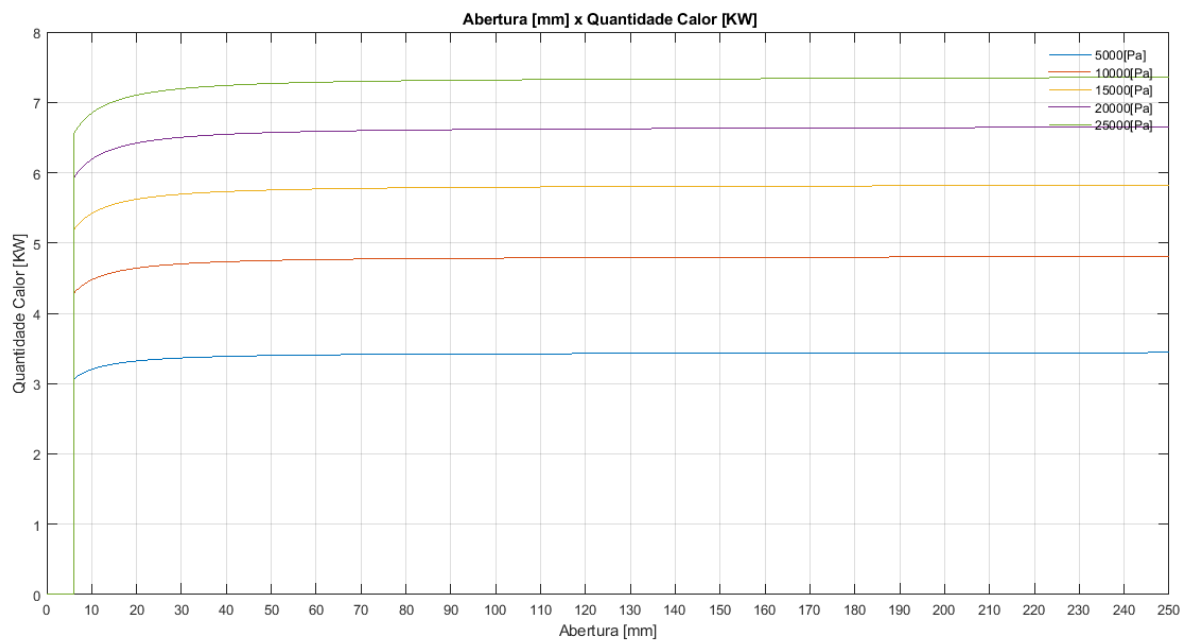


Figura 80 – Modelo 26 (Tabela 6) - Quantidade de Calor

B.6.3 Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade

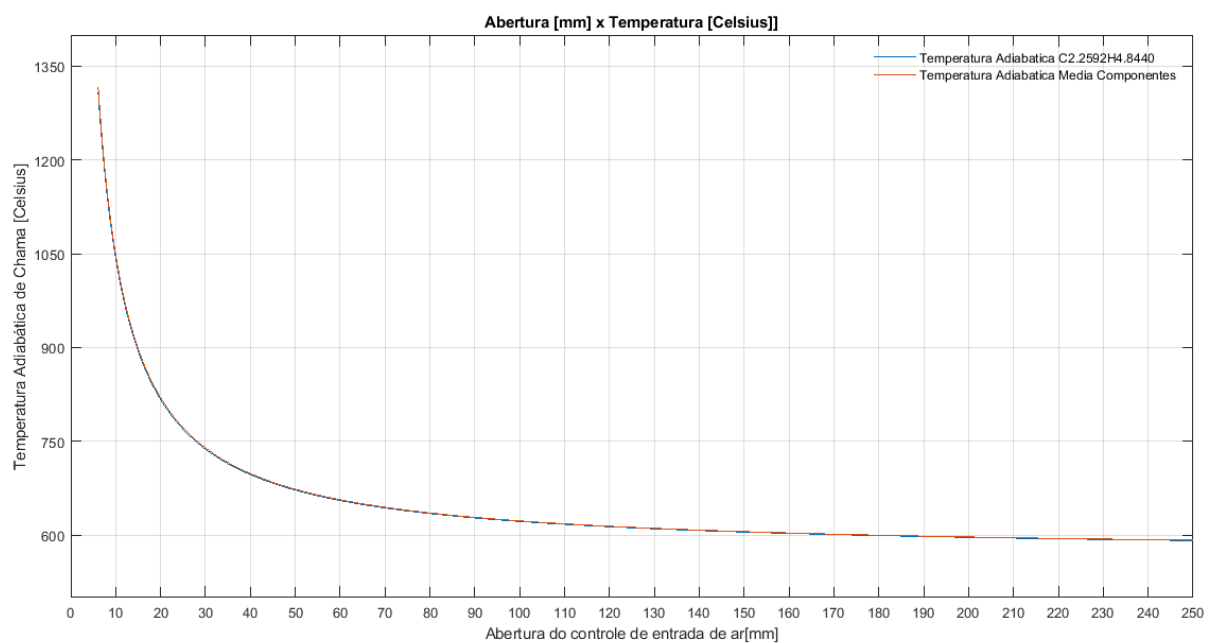


Figura 81 – Modelo 26 (tabela 6) - Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade

B.7 Modelo 27

B.7.1 Razão Mistura e Temperatura Adiabática de Chama em função da abertura

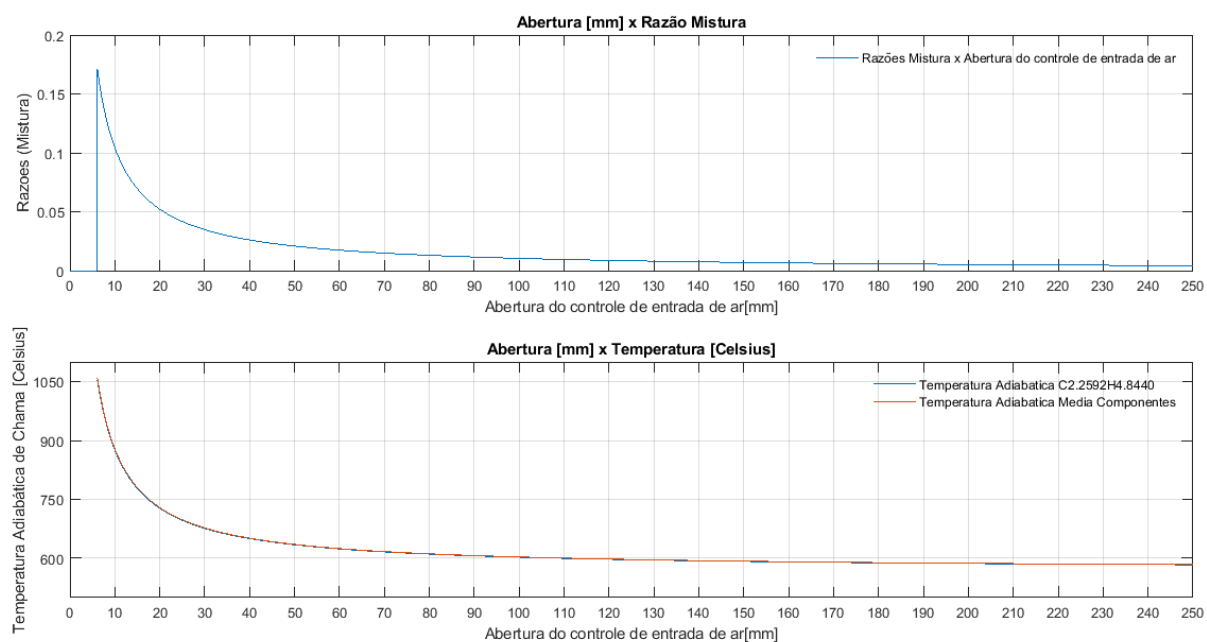


Figura 82 – Modelo 27 (Tabela 6) - Controle Temperatura - Abertura e Razões Equivalentes

B.7.2 Quantidade de Calor

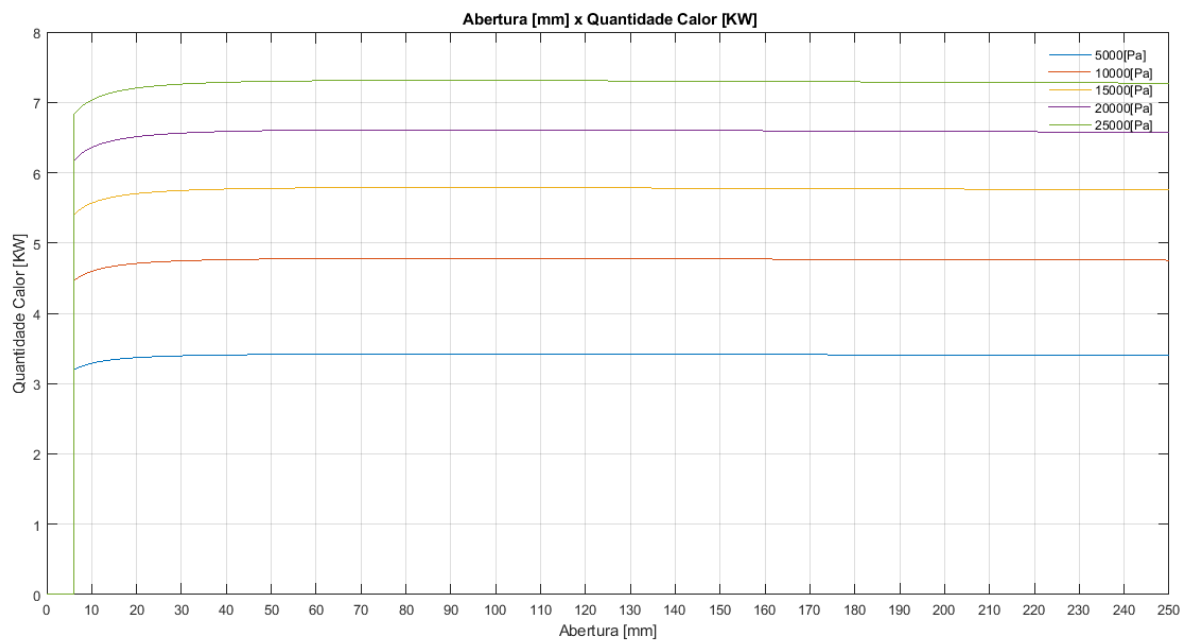


Figura 83 – Modelo 27 (Tabela 6) - Quantidade de Calor

B.7.3 Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade

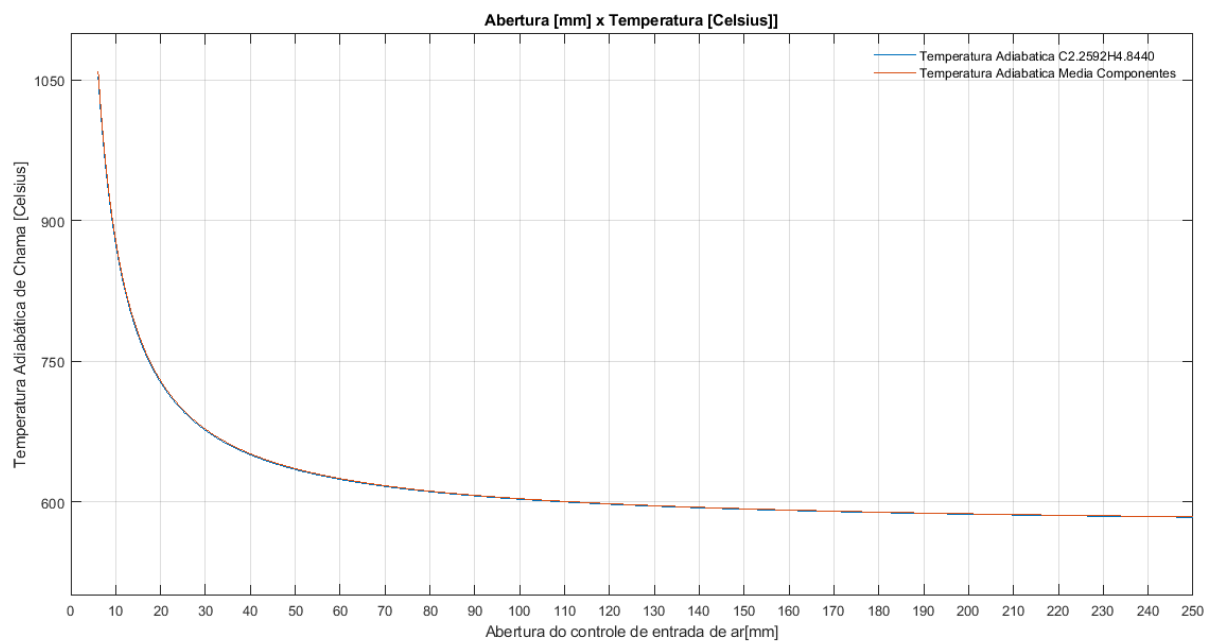


Figura 84 – Modelo 27 (tabela 6) - Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade

B.8 Modelo 28

B.8.1 Razão Mistura e Temperatura Adiabática de Chama em função da abertura

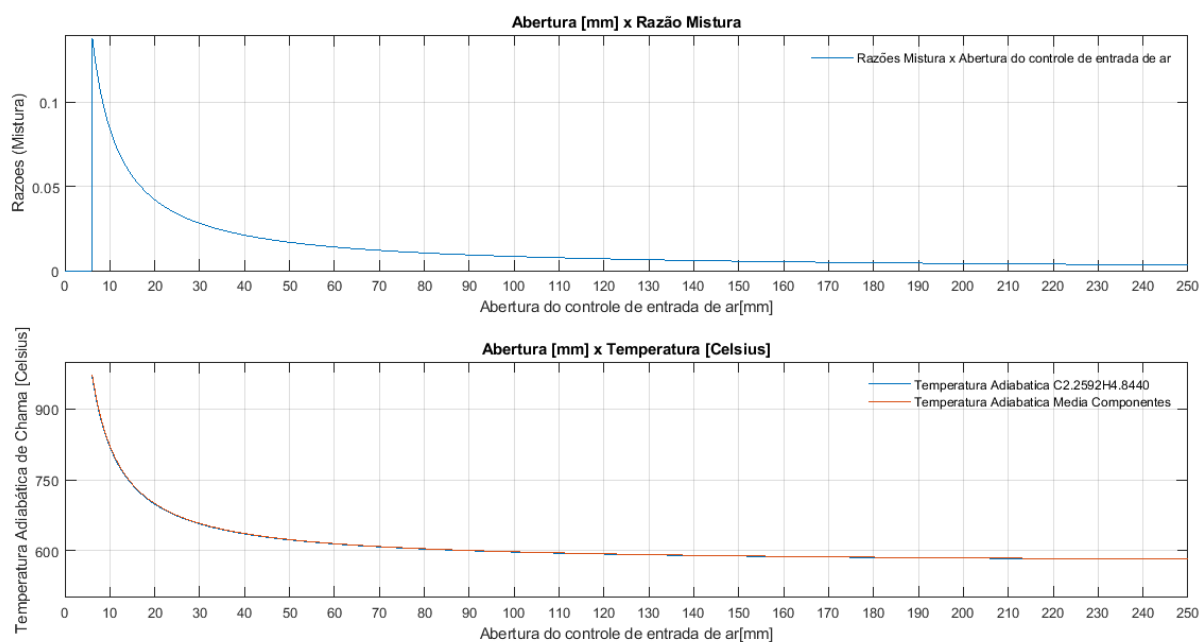


Figura 85 – Modelo 28 (Tabela 6) - Controle Temperatura - Abertura e Razões Equivalentes

B.8.2 Quantidade de Calor

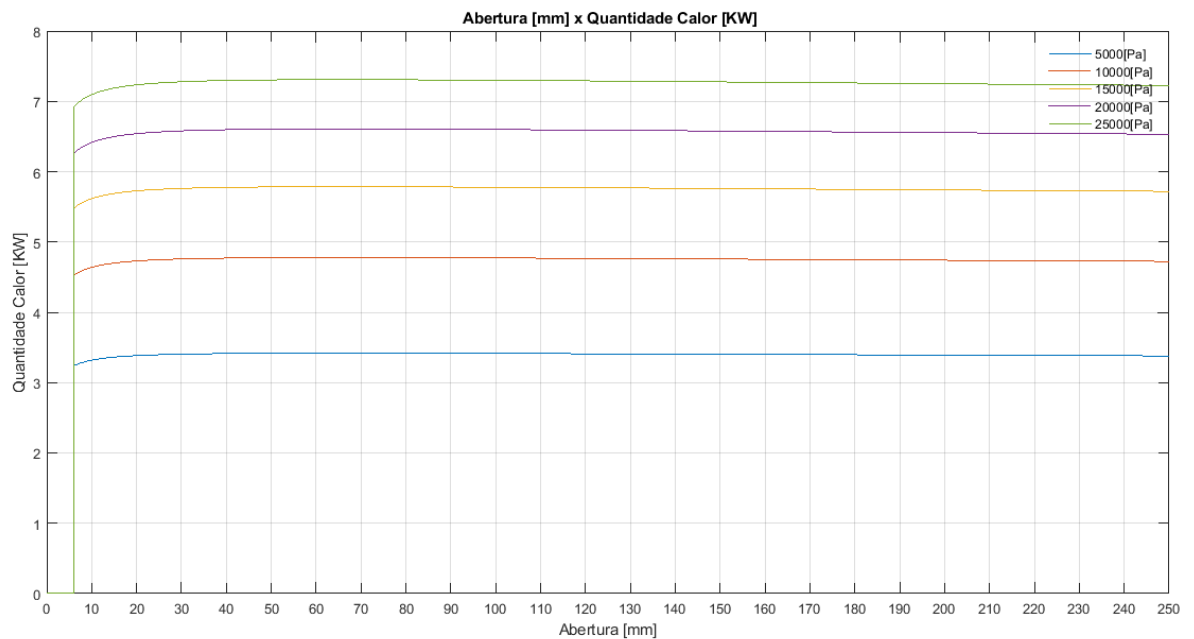


Figura 86 – Modelo 28 (Tabela 6) - Quantidade de Calor

B.8.3 Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade

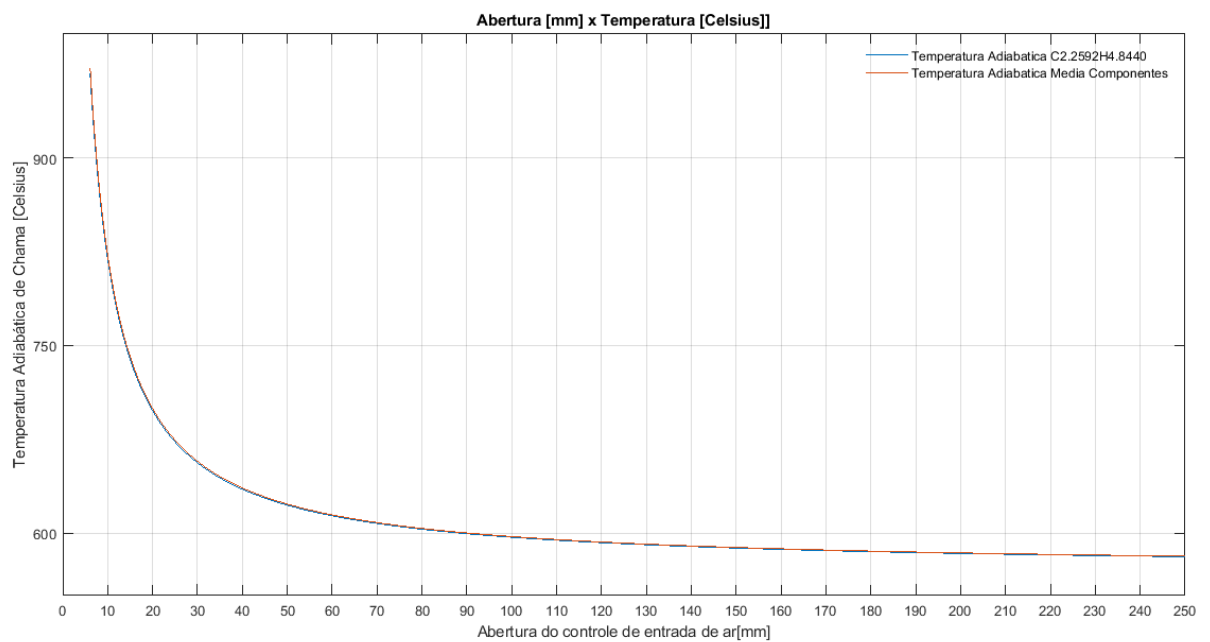


Figura 87 – Modelo 28 (tabela 6) - Temperatura Adiabática - Limites e Controlabilidade

APÊNDICE C – Códigos Matlab - Dimensionamento Preliminar

Os algoritmos relacionados nos apêndice que se seguem foram desenvolvidos para limitar o escopo do projeto e convergir na melhor solução para o queimador e forno desejados.

Autor: Luís Fernando Marzola da Cunha
Matlab License: 40791680

C.1 Código Principal: relaciona os demais códigos de cada função

Listing C.1 – Código 1

```

1
2 clear all
3 close all
4 clc
5
6 %
7 % ----- Dimensionamento
8 %
9 modelo = 31; #####
10 pressao_atmosferica = 101325; %[Pa] Press o Atmosferica
11 %pressao_maxima_operacao = pressao_atmosferica+10000; %[Pa] %
    Press o manometrica maxima de opera o do g s antes da
    combust o , no escoamento entre bocal,garganta e difusor
12 pressao_maxima_operacao = 100000; %[Pa] %Press o manometrica
    maxima de opera o do g s antes da combust o , no
    escoamento entre bocal,garganta e difusor
13 passo_pressao_operacao = 1; %[Pa]
```

```

14 pressao_range = 0:passo_pressao_operacao:
    pressao_maxima_operacao;
15 razaobocal_maxima = 0.3;#####razao RAI0 BOCAL (
    RaioGarganta/RaioBocal) tubo 3/4 (2mm) + tubo 3.1/2 (6mm
    )
16 passo_bocal = 1*razaobocal_maxima;%Valor absoluto, percentual
    da razao maxima
17 comprimento_abertura_maxima = 250/1000;#####[m]
18 passo_abertura = 1/10000; #####[m]
19 espessura_tubo_garganta = 1.9 ;[mm] Espessura do Tubo
    utilizado para "camara de mistura"
20 raio_garganta = (((25.4/2)-(espessura_tubo_garganta))*1)
    /1000;#####[m] 3/4
21
22
23
24 if razaobocal_maxima>1
25     area_abertura_parede_bocal = (2*3.14*(raio_garganta)*(
        razaobocal_maxima))/25.13274123;#####;
26     comprimento_doispiR_bocal = (2*3.14*(raio_garganta)*(
        razaobocal_maxima));
27 else
28     area_abertura_parede_bocal = (2*3.14*(raio_garganta)*(1/
        razaobocal_maxima))/25.13274123;#####;
29     comprimento_doispiR_bocal = (2*3.14*(raio_garganta)*(
        razaobocal_maxima));
30 end
31
32 comprimento_rasgo = area_abertura_parede_bocal/3; #####
    comprimento em mm de um dos tres rasgos no cilindro de
    controle da abertura
33 raio_bocal = (raio_garganta)/(razaobocal_maxima);
34 diamentro_furo_bico_gicle = 0.8/1000; #####[m]
    Importante para variar a capacidade/potencia calor fica
    do queimador
35 area_bico_gicle = 3.14*((diamentro_furo_bico_gicle/2)^2);
36 diamentro_duto_gas = 10/1000; #####[m] Importante para
    variar a capacidade/potencia calor fica do queimador
37 area_duto_gas = 3.14*((diamentro_duto_gas/2)^2);

```

```

38 massa_cilindro = 13;%[kg] Importante para dimensionar o
    recipiente de armazenamento de forma que n o congele com
    o fluxo m ssico primario
39
40 %Nome dos arquivos:
    NomeArquivo_RaioGarganta_Raz oBocal_AreaRasgo_ComprimentoRegulagem
41 % raio_garganta,espessura_tubo_garganta,razaobocal_maxima,
    area_abertura_parede_bocal,comprimentoabertura_maxima,
    pressao_maxima_operacao,passo_abertura,
    diamentro_furo_bico_gicle, massa_cilindro
42
43
44 % ----- Mol culas
    -----
45 %
    -----
46 %Moleculas [ 1      2      3      4      5      6      7      8      9      10     11
    12]
47 %Moleculas [Mistura C4H10 C3H8 C4H8 C3H6 CO CO2 H2O N2 CH4 O2
    ar]
48 %Moleculas [Mistura Butano Propano Buteno Propeno CO CO2 H2O
    N2 CH4 O2 ar]
49 x =[2.2592 4 3 4 3 1 1 0 0 1 0];
50 y =[4.844 10 8 8 6 0 0 2 0 4 2];
51 ru = 8.31447; %[kJ/kMol.K] constante universal dos gases
52 molecula = [1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11]; %posi o da molecula
    no vetor dentro da fun o temp_adiabatica
53 percentmist = [1 0.2333 0.1434 0.3176 0.3047 1 1 1 1 1 1]; %
    Porcentagens do total da mistura GLP Fonte: Fog s
54 massamolar = [50.42 58 44 56 42 28 44 18 28 16 32 28.84]; %[
    kg/kMol]Massa molar
55 razaoest = [(percentmist(2)*((x(2)+(y(2)/4))*4.76*(massamolar
    (12)/massamolar(2)))) + percentmist(3)*((x(3)+(y(3)/4))
    *4.76*(massamolar(12)/massamolar(3)))) + percentmist(4)*((x
    (4)+(y(4)/4))*4.76*(massamolar(12)/massamolar(4)))) +
    percentmist(5)*((x(5)+(y(5)/4))*4.76*(massamolar(12)/
    massamolar(5)))) ((x(2)+(y(2)/4))*4.76*(massamolar(12)/

```

```

    massamolar(2))) ((x(3)+(y(3)/4))*4.76*(massamolar(12)/
    massamolar(3))) ((x(4)+(y(4)/4))*4.76*(massamolar(12)/
    massamolar(4))) ((x(5)+(y(5)/4))*4.76*(massamolar(12)/
    massamolar(5)))]]; % Calculada, presente no trabalho
56 razaoest2 = [1 15.38 15.6 14.7 14.7 0 0 0 0 0 0]; % Calculada
    , presente no trabalho
57 temp_critica = [1 407.7 369.9 419 365.2 1 1 1 1 190.6 1]; %[K
    ]Phase Change Data %Fonte: National Institute of Standarts
    and Technology
58 pressao_critica =100000*[1 36.5 42.5 40.2 46 1 1 1 1 46.1 1];
    %[Pa] Phase Change Data%Fonte: National Institute of
    Standarts and Technology
59 volume_especifico_critico = [1 0.259 0.2 0.2408 0.1846 1 1 1
    1 0.0986 1]; %[m /Kmol] Phase Change Data %Fonte:
    National Institute of Standarts and Technology
60 const_gas = [ru/massamolar(1) ru/massamolar(2) ru/massamolar
    (3) ru/massamolar(4) ru/massamolar(5) ru/massamolar(6) ru/
    massamolar(7) ru/massamolar(8) ru/massamolar(9) ru/
    massamolar(10) ru/massamolar(11)]; %[kJ/kg.K]
61 sstandar298 = 4180*[0 70.94 0 0 0 47.21 51.07 45.11 45.77
    44.49 49.01]; %[kJ/kMol.k] Entropia Padr o 298k Fonte:
    Chemkin
62 hstandar298_data = 4186.7988*[0 -32.02 0 0 0 -26.42 -94.05
    -57.8 0 -17.9 0]; %[kJ/kMol]Entalpia Padrao 298k 'data'
    Fonte:Chemkin
63 hstandar298_fit = 4186.7988*[0 -31.84 -24.82 -0.13 4.89
    -26.42 -94.05 -57.8 0 -17.9 0]; %[kJ/kMol]Entalpia Padrao
    298k 'fit' Fonte:Chemkin
64 volum_specif_mol = (((0.263*percentmist(2))+(0.2*percentmist
    (3))+(0.2408*percentmist(4))+(0.1846*percentmist(5)))
    0.263 0.2 0.2408 0.1846 0 0 0 0 0 0 0 0)];% [L/mol] Phase
    Change Data %Fonte: National Institute of Standarts and
    Technology
65 volum_specif_kg = [(volum_specif_mol(1)/massamolar(1)) (
    volum_specif_mol(2)/massamolar(2)) (volum_specif_mol(3)/
    massamolar(3)) (volum_specif_mol(4)/massamolar(4)) (
    volum_specif_mol(5)/massamolar(5)) 0 0 0 0 0.002364 0];% [
    m /kg] Phase Change Data %Fonte: National Institute of
    Standarts and Technology

```

```

66 massa_especifica = 1/100*[((volum_especif_kg(1))^-1) ((
    volum_especif_kg(2))^-1) ((volum_especif_kg(3))^-1) ((
    volum_especif_kg(4))^-1) ((volum_especif_kg(5))^-1) ((
    volum_especif_kg(6))^-1) ((volum_especif_kg(7))^-1) ((
    volum_especif_kg(8))^-1) ((volum_especif_kg(9))^-1) ((
    volum_especif_kg(10))^-1) ((volum_especif_kg(11))^-1) ]; %[
    kg/m^3]
67 fracaomolar_Total = [1 (percentmist(2)*massa_cilindro)/
    massamolar(2) (percentmist(3)*massa_cilindro)/massamolar
    (3) (percentmist(4)*massa_cilindro)/massamolar(4) (
    percentmist(5)*massa_cilindro)/massamolar(5) 0 0 0]; %[Kmol
    ] Fra o Molar Total em Fun o do Cilindro utilizado (
    Capacidade de Armazenamento)
68 fracaomassa_Total = [1 (fracaomolar_Total(2)*massamolar(2)) (
    fracaomolar_Total(3)*massamolar(3)) (fracaomolar_Total(4)*
    massamolar(4)) (fracaomolar_Total(5)*massamolar(5)) 1 1 1
    1 1 1]; %[kg] Fra o M ssica das Mol culas Total em
    Fun o do Cilindro utilizado (Capacidade de
    Armazenamento)
69
70
71
72 %
    -----
73 % ----- Compressibilidade do G s
    -----
74 %
    -----
75
76 %Afim de checar as press es de opera o do g s , de modo
    que trabalhemos em
77 %regime incompress vel; deve-se checar o fator de
    compressibilidade do
78 %mesmo. Para isso, determine a press o m xima de opera o
    [Pa], passo por
79 %itera o [Pa].
80

```

```

81
82 % A molecula 1      a mistura.
83 % Como sa da desta fun  o , tem-se a press o reduzida,
      temperatura reduzida
84 % e volume reduzido
85
86
87 [pressao_reduzida(2,:),temperatura_reduzida(2,:),
      pressao_range1] = QATM_2_fator_compressibilidade(molecula
      (2),pressao_maxima_operacao,passo_pressao_operacao,
      percentmist,temp_critica,pressao_critica,
      volume_especifico_critico,const_gas,pressao_atmosferica);
88 [pressao_reduzida(3,:),temperatura_reduzida(3,:),
      pressao_range1] = QATM_2_fator_compressibilidade(molecula
      (3),pressao_maxima_operacao,passo_pressao_operacao,
      percentmist,temp_critica,pressao_critica,
      volume_especifico_critico,const_gas,pressao_atmosferica);
89 [pressao_reduzida(4,:),temperatura_reduzida(4,:),
      pressao_range1] = QATM_2_fator_compressibilidade(molecula
      (4),pressao_maxima_operacao,passo_pressao_operacao,
      percentmist,temp_critica,pressao_critica,
      volume_especifico_critico,const_gas,pressao_atmosferica);
90 [pressao_reduzida(5,:),temperatura_reduzida(5,:),
      pressao_range1] = QATM_2_fator_compressibilidade(molecula
      (5),pressao_maxima_operacao,passo_pressao_operacao,
      percentmist,temp_critica,pressao_critica,
      volume_especifico_critico,const_gas,pressao_atmosferica);
91
92 Pressao_reduzida_Mistura = (pressao_reduzida(2,:)*percentmist
      (2))+(pressao_reduzida(3,:)*percentmist(3))+(
      pressao_reduzida(4,:)*percentmist(4))+(pressao_reduzida
      (5,:)*percentmist(5));
93 Temperatura_reduzida_Mistura = (temperatura_reduzida(2,:)*
      percentmist(2))+(temperatura_reduzida(3,:)*percentmist(3))
      +(temperatura_reduzida(4,:)*percentmist(4))+(
      temperatura_reduzida(5,:)*percentmist(5));
94
95 %Refer ncia: Fator de Compressibilidade da mistura - Pagina
      698 Livro

```



```

96 %Termodinamica Cengel 7 edi o
97
98
99 %A press es reduzidas muito baixas ( $Pr \ll 1$ ) o gas se comporta
    como g s ideal
100 %independente da temperatura REferencia Cengel, 8 Edi o
    2015
101
102
103
104
105
106 %
    -----
107 % ----- Propriedades com Temperatura Antes da Queima, Cp, Cv
    e K -----
108 %
    -----
109
110 %
    -----
111 %----- Dados Fun o Temperatura de Chama
    -----
112 %
    -----
113 %Calcular Cp para moleculas cp_CO2 cp_H2O cp_O2 cp_N2 at
    5000K
114 passo_temp_range = 1;
115 T_inicial_gas = 0; %[K] Temperatura inicial do g s para
    calculo das propriedades em fun o da temperatura dos
    gases
116 temp_final_range = 2772; %[K] Temperatura final: delimita a
    faixa de temperatura para a qual as propriedades dos gases
    s o calculadas na fun o QATM_2_Calculo_temp_Cp_Cv_K
117 %fluxo_massico_primario = 1.097715849685059e-05;

```

```

118
119
120
121 [vel_som_gas,Cp(7,:),Cp(8,:),Cp(11,:),Cp(9,:),Cv(7,:),Cv(8,:),
    ,Cv(11,:),Cv(9,:),Cp(2,:),Cp(3,:),Cp(4,:),Cp(5,:),Cv(2,:),
    Cv(3,:),Cv(4,:),Cv(5,:),K(2,:),K(3,:),K(4,:),K(5,:),K(1,:),
    ,Cp(1,:),Cv(1,:),volum_specif_kg_COMPONENTES,
    volum_specif_mol_COMPONENTES,temp_gas_frio_func_press(2,:),
    ,temp_gas_frio_func_press(3,:),temp_gas_frio_func_press
    (4,:),temp_gas_frio_func_press(5,:),
    temp_gas_frio_func_press(1,:),pressao_MISTURA] =
    QATM_2_Calculo_temp_Cp_Cv_K(passo_temp_range,
    temp_final_range,pressao_maxima_operacao,
    passo_pressao_operacao,T_inicial_gas,volum_specif_kg,
    const_gas,percentmist,volum_specif_mol,ru,massamolar);
122 [vel_som_gas_queima,Cp_queima(7,:),Cp_queima(8,:),Cp_queima
    (11,:),Cp_queima(9,:),Cv_queima(7,:),Cv_queima(8,:),
    Cv_queima(11,:),Cv_queima(9,:),Cp_queima(2,:),Cp_queima
    (3,:),Cp_queima(4,:),Cp_queima(5,:),Cv_queima(2,:),
    Cv_queima(3,:),Cv_queima(4,:),Cv_queima(5,:),K_queima(2,:),
    ,K_queima(3,:),K_queima(4,:),K_queima(5,:),K_queima(1,:),
    Cp_queima(1,:),Cv_queima(1,:),
    volum_specif_kg_COMPONENTES_queima,
    volum_specif_mol_COMPONENTES_queima,
    temp_gas_frio_func_press_queima(2,:),
    temp_gas_frio_func_press_queima(3,:),
    temp_gas_frio_func_press_queima(4,:),
    temp_gas_frio_func_press_queima(5,:),
    temp_gas_frio_func_press_queima(1,:),
    pressao_MISTURA_queima] =
    QATM_2_Calculo_temp_Cp_Cv_K_QUEIMA(passo_temp_range,
    temp_final_range,pressao_maxima_operacao,
    passo_pressao_operacao,T_inicial_gas,volum_specif_kg,
    const_gas,percentmist,volum_specif_mol);
123 K(12,:) = 1.4;% Coeficiente de expans o do ar
124 massa_especifica(1,12) = 1.22; %[kg/m^3] Massa espec fica do
    ar
125 Cp(12,:) = 1.005;
126

```

```

127 % a Temperatura do gas frio em fun o da press o dada
    em [K/kg], ou seja,
128 % tem que multiplicar pelo fluxo m ssico.
129 %[K/kg] Temperatura em fun o da press o por quilograma,
    ou seja, tem que multiplicar pelo fluxo massico
130
131
132
133
134 %
    -----

135 %--- Calculos Vaz o , Mistura em Fun o dos Parametros de
    Dimensionamento --
136 %
    -----

137
138
139
140 [mach,gama,fluxo_massico_final,razao_real,abertura,
    razao_estequiometrica,razao_mistura,
    fluxo_massico_secundario,tempo_consumo,
    fluxo_massico_primario,dif_pressao_bocal_garganta,
    vel_primaria,vel_secundaria]=Velocidade_primaria(
    massa_especifica,pressao_MISTURA,passo_pressao_operacao,
    pressao_atmosferica,K,razaobocal_maxima,area_bico_gicle,
    massa_cilindro,comprimentoabertura_maxima,passo_bocal,
    passo_abertura,area_abertura_parede_bocal,percentmist,
    vel_som_gas,area_duto_gas,ru);
141
142
143
144 %
    -----

145 %----- Temperatura Adiab tica de Chama
    -----

```

```

146 %
    -----

147
148
149
150
151
152 T_inicial_gas = 298;
153 passo_mist = 0.001; % passo, incremento da mistura para
    calculo da temperatura
154 Temp_adiabatica = [];
155 entalp_reagente = [];
156 entalp_produto = [];
157
158 [Temp_adiabatica(1,:), entalp_reagente(1,:), entalp_produto
    (1,:)] = temp_adiabatica(x(1), y(1), T_inicial_gas,
    passo_mist, passo_temp_range, temp_final_range, molecula(1),
    razaoest, razao_mistura, ru, hstandar298_data);
159 [Temp_adiabatica(2,:), entalp_reagente(2,:), entalp_produto
    (2,:)] = temp_adiabatica(x(2), y(2), T_inicial_gas,
    passo_mist, passo_temp_range, temp_final_range, molecula(2),
    razaoest, razao_mistura, ru, hstandar298_data);
160 [Temp_adiabatica(3,:), entalp_reagente(3,:), entalp_produto
    (3,:)] = temp_adiabatica(x(3), y(3), T_inicial_gas,
    passo_mist, passo_temp_range, temp_final_range, molecula(3),
    razaoest, razao_mistura, ru, hstandar298_data);
161 [Temp_adiabatica(4,:), entalp_reagente(4,:), entalp_produto
    (4,:)] = temp_adiabatica(x(4), y(4), T_inicial_gas,
    passo_mist, passo_temp_range, temp_final_range, molecula(4),
    razaoest, razao_mistura, ru, hstandar298_data);
162 [Temp_adiabatica(5,:), entalp_reagente(5,:), entalp_produto
    (5,:)] = temp_adiabatica(x(5), y(5), T_inicial_gas,
    passo_mist, passo_temp_range, temp_final_range, molecula(5),
    razaoest, razao_mistura, ru, hstandar298_data);
163 %Calculo M dia Ponderada Temperatura Adiabatica
164 Temp_adiabatica_media = (Temp_adiabatica(2,:)*
    percentmist(2))+(Temp_adiabatica(3,:)*percentmist
    (3))+(Temp_adiabatica(4,:)*percentmist(4))+

```

```
Temp_adiabatica(5,:)*percentmist(5));
165
166 Temp_adiabatica(6,:) = Temp_adiabatica_media;
167 Temp_adiabatica(7,:) = Temp_adiabatica(1,:);
168 %Entalpia dos Reagentes Media
169 Entalp_reagentes_media = (entalp_reagente(2,:)*
    percentmist(2))+(entalp_reagente(3,:)*percentmist
    (3))+(entalp_reagente(4,:)*percentmist(4))+(
    entalp_reagente(5,:)*percentmist(5));
170
171 Entalp_reagente(6,:) = Entalp_reagentes_media;
172 Entalp_reagente(7,:) = Entalp_reagente(1,:);
173 %Entalpia dos Produtos Media
174 Entalp_produtos_media = (entalp_produto(2,:)*
    percentmist(2))+(entalp_produto(3,:)*percentmist
    (3))+(entalp_produto(4,:)*percentmist(4))+(
    entalp_produto(5,:)*percentmist(5));
175
176 %Entalpia de Combust o M dia
177 Entalp_combust_media = Entalp_produtos_media -
    Entalp_reagentes_media;
178
179
180 %Calculo M dia Ponderada Razao Estequiometrica
181 %razaoest_media = (razaoest(2)*percentmist(2))+(
    razaoest(3)*percentmist(3))+(razaoest(4)*
    percentmist(4))+(razaoest(5)*percentmist(5));
182 %Calculo M dia Ponderada Cp
183 %cp_media = (razaoest(2)*percentmist(2))+(razaoest(3)
    *percentmist(3))+(razaoest(4)*percentmist(4))+(
    razaoest(5)*percentmist(5));
184 %razaoest_media = razaoest(1);
185
186
187
188 %
```

```
189 %----- Quantidade de Calor Gerada
190 %
191 -----
192
193 [cpmedio,quantidade_calor_total] = QATM_Quantidadecalor(
194     T_inicial_gas,fluxo_massico_final,Cp,Cv,K,Temp_adiabatica,
195     passo_pressao_operacao,pressao_maxima_operacao,
196     fluxo_massico_primario,fluxo_massico_secundario,Cp_queima,
197     Cv_queima,K_queima,percentmist,abertura,pressao_MISTURA);
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207 %
208 -----
209 %----- Resultados
210 -----
211
212
213
214
215
```

```

216 %
    -----
217 %----- Compressibilidade do G s no referido
    Escoamento -----
218 %
    -----

219
220 figure(1)
221
222 plot(pressao_range,pressao_reduzida(2,:))
223 hold on
224 plot(pressao_range,pressao_reduzida(3,:))
225 hold on
226 plot(pressao_range,pressao_reduzida(4,:))
227 hold on
228 plot(pressao_range,pressao_reduzida(5,:))
229 hold on
230 plot(pressao_range,Pressao_reduzida_Mistura)
231 grid minor
232
233 dim = [.2 .8 .1 .1];
234 str = 'Press o Reduzida dos Gases em Fun o da Press o de
    Opera o do Queimador';
235 %annotation('textbox',dim,'String',str);
236 % raio_garganta,,espessura_tubo_garganta,razaobocal_maxima,
    area_abertura_parede_bocal,comprimentoabertura_maxima,
    pressao_maxima_operacao,passo_abertura,
    diamentro_furo_bico_gicle,massa_cilindro
237 str2=sprintf('%.d Compressibilidade dos Gases ');
238 str2_1=sprintf('%.d_Compressibilidade_Gases',modelo);
239 title(sprintf('%s',str2))
240 xlabel('Press o Opera o [Pa]')
241 ylabel('Press o Reduzida')
242
243 legend('C4H10','C3H8','C4H8','C3H6','Mistura')
244 legend('boxoff')
245

```

```

246 saveas(gcf,sprintf('%s.png',str2_1))
247
248
249 %
-----
250 %
-----
251 %
-----

252
253 figure(2)
254 subplot(2,1,1)
255 plot(1000*abertura,razao_mistura(:,2))
256 grid
257 %str3=sprintf('%d Abertura [mm] x Raz o Mistura \n _ Raio
    Garganta:%.2f[mm] _ Espessura Tubo Garganta:%.2f[mm] _
    Raz o Bocal:%.2f _ \n rea Abertura:%.2f[mm] _
    Comprimento M ximo Regulagem:%.2f[mm] _ Press o M xima
    Opera o%.2f[Pa] _ \n Passo Abertura: %.2f[mm] _
    Di metro Bico:%.2f[mm] _ Massa Cilindro:%.2f[kg] \n',
    modelo,raio_garganta*1000,espessura_tubo_garganta*1000,
    razaobocal_maxima,area_abertura_parede_bocal*1000,
    comprimentoabertura_maxima*1000,pressao_maxima_operacao,
    passo_abertura*1000,diamentro_furo_bico_gicle*1000,
    massa_cilindro);

258 str3=sprintf(' Abertura [mm] x Raz o Mistura ');
259 str3_1=sprintf('%d_Controlo_Razao',modelo);
260 title(sprintf('%s',str3))
261 ylabel('Razoes (Mistura)')
262 xlabel('Abertura do controle de entrada de ar[mm]')
263 yticks(0:0.05:1)
264 xticks(0:10:250)
265 legend('Raz es Mistura x Abertura do controle de entrada de
    ar')
266 legend('boxoff')
267

```



```

268 %saveas(gcf,sprintf('%s.jpg',str3_1))
269
270
271
272 subplot(2,1,2)
273 plot(1000*abertura,Temp_adiabatica(6,:)+273)
274 hold on
275 plot(1000*abertura,Temp_adiabatica(7,:)+273)
276 grid
277 %str4=sprintf('%d Abertura [mm] x Temperatura [Celsius] \n
    _ Raio Garganta:%.2f[mm] _ Espessura Tubo Garganta:%.2f[mm]
    ] _ Raz o Bocal:%.2f _ \n rea Abertura:%.2f[mm] _
    Comprimento M ximo Regulagem:%.2f[mm] _ Press o M xima
    Opera o%.2f[Pa] _ \n Passo Abertura: %.2f[mm] _
    Di metro Bico:%.2f[mm] _ Massa Cilindro:%.2f[kg] \n',
    modelo,raio_garganta*1000,espessura_tubo_garganta*1000,
    razaobocal_maxima,area_abertura_parede_bocal*1000,
    comprimentoabertura_maxima*1000,pressao_maxima_operacao,
    passo_abertura*1000,diamentro_furo_bico_gicle*1000,
    massa_cilindro);
278 str4=sprintf(' Abertura [mm] x Temperatura [Celsius] ');
279 str4_1=sprintf('%d_Controle_Temperatura',modelo);
280 title(sprintf('%s',str4))
281 xlabel('Abertura do controle de entrada de ar[mm]')
282 ylabel('Temperatura Adiab tica de Chama [Celsius]')
283 yticks(0:150:2500)
284 xticks(0:10:250)
285 legend('Temperatura Adiabatica C2.2592H4.8440','Temperatura
    Adiabatica Media Componentes')
286 legend('boxoff')
287
288
289 saveas(gcf,sprintf('%s.png',str4_1))
290
291
292
293 %
    -----

```

```

294 %
    -----

295 %
    -----

296
297 figure(3)
298
299
300
301 plot(1000*abertura,Temp_adiabatica(6,:)+273)
302 hold on
303 plot(1000*abertura,Temp_adiabatica(7,:)+273)
304 grid
305 %str4=sprintf('%d Abertura [mm] x Temperatura [Celsius]] \n
    _ Raio Garganta:%.2f[mm] _ Espessura Tubo Garganta:%.2f[mm]
    ] _ Raz o Bocal:%.2f _ \n rea Abertura:%.2f[mm] _
    Comprimento M ximo Regulagem:%.2f[mm] _ Press o M xima
    Opera o%.2f[Pa] _ \n Passo Abertura: %.2f[mm] _
    Di metro Bico:%.2f[mm] _ Massa Cilindro:%.2f[kg] \n',
    modelo,raio_garganta*1000,espessura_tubo_garganta*1000,
    razaobocal_maxima,area_abertura_parede_bocal*1000,
    comprimentoabertura_maxima*1000,pressao_maxima_operacao,
    passo_abertura*1000,diamentro_furo_bico_gicle*1000,
    massa_cilindro);
306 str4=sprintf(' Abertura [mm] x Temperatura [Celsius]] ');
307 str4_1=sprintf('%d_Abertura_Temperatura_Controlabilidade',
    modelo);
308 title(sprintf('%s',str4))
309 xlabel('Abertura do controle de entrada de ar[mm]')
310 ylabel('Temperatura Adiab tica de Chama [Celsius]')
311 yticks(0:150:2500)
312 xticks(0:10:250)
313 legend('Temperatura Adiabatica C2.2592H4.8440','Temperatura
    Adiabatica Media Componentes')
314 legend('boxoff')
315
316 saveas(gcf,sprintf('%s.png',str4_1))

```

```
317
318 figure(4)
319
320 plot(abertura*1000,quantidade_calor_total(:,5000))
321 hold on
322 plot(abertura*1000,quantidade_calor_total(:,10000))
323 hold on
324 plot(abertura*1000,quantidade_calor_total(:,15000))
325 hold on
326 plot(abertura*1000,quantidade_calor_total(:,20000))
327 hold on
328 plot(abertura*1000,quantidade_calor_total(:,25000))
329 hold on
330 plot(abertura*1000,quantidade_calor_total(:,30000))
331 hold on
332 plot(abertura*1000,quantidade_calor_total(:,35000))
333 hold on
334 plot(abertura*1000,quantidade_calor_total(:,40000))
335 hold on
336 plot(abertura*1000,quantidade_calor_total(:,45000))
337 hold on
338 plot(abertura*1000,quantidade_calor_total(:,50000))
339 hold on
340 plot(abertura*1000,quantidade_calor_total(:,55000))
341 hold on
342 plot(abertura*1000,quantidade_calor_total(:,60000))
343 hold on
344 plot(abertura*1000,quantidade_calor_total(:,65000))
345 hold on
346 plot(abertura*1000,quantidade_calor_total(:,70000))
347 hold on
348 plot(abertura*1000,quantidade_calor_total(:,75000))
349 hold on
350 plot(abertura*1000,quantidade_calor_total(:,80000))
351 hold on
352 plot(abertura*1000,quantidade_calor_total(:,85000))
353 hold on
354 plot(abertura*1000,quantidade_calor_total(:,90000))
355 hold on
```

```

356 plot(abertura*1000,quantidade_calor_total(:,95000))
357 hold on
358 plot(abertura*1000,quantidade_calor_total(:,100000))
359 hold on
360 grid
361 %str7=sprintf('%d Abertura [mm] x Quantidade Calor [KW] \n _
    Raio Garganta:%.2f[mm] _ Espessura Tubo Garganta:%.2f[mm]
    _ Raz o Bocal:%.2f _ \n rea Abertura:%.2f[mm] _
    Comprimento M ximo Regulagem:%.2f[mm] _ Press o M xima
    Opera o%.2f[Pa] _ \n Passo Abertura: %.2f[mm] _
    Di metro Bico:%.2f[mm] _ Massa Cilindro:%.2f[kg] \n',
    modelo,raio_garganta*1000,espessura_tubo_garganta*1000,
    razaobocal_maxima,area_abertura_parede_bocal*1000,
    comprimentoabertura_maxima*1000,pressao_maxima_operacao,
    passo_abertura*1000,diamentro_furo_bico_gicle*1000,
    massa_cilindro);
362 str7=sprintf(' Abertura [mm] x Quantidade Calor [KW]');
363 str7_1=sprintf('%d_Quantidade_Calor',modelo);
364 title(sprintf('%s',str7))
365 legend('5000[Pa]','10000[Pa]','15000[Pa]','20000[Pa]','25000[
    Pa]','30000[Pa]','35000[Pa]','40000[Pa]','450000[Pa]','
    50000[Pa]','55000[Pa]','60000[Pa]','65000[Pa]','70000[Pa]
    ','75000[Pa]','80000[Pa]','85000[Pa]','90000[Pa]','95000[Pa
    ]','100000[Pa]')
366 %legend('5000[Pa]','10000[Pa]','15000[Pa]','20000[Pa
    ]','25000[Pa]');
367 xlabel('Abertura [mm]')
368 ylabel('Quantidade Calor [KW]')
369 xticks(0:10:250)
370 yticks('auto')
371 legend('boxoff')
372
373 saveas(gcf,sprintf('%s.png',str7_1))
374
375 %
    -----
376 %
    -----

```

```

377 %
    -----

378
379
380 figure(5)
381 subplot(2,1,1)
382 plot(razao_mistura(:,2),Temp_adiabatica(6,:)+273)
383 hold on
384 plot(razao_mistura(:,2),Temp_adiabatica(7,:)+273)
385 hold on
386 grid
387 %str5=sprintf('%.d Raz o Mistura x Temperatura [Celsius]] \n
    _ Raio Garganta:%.2f[mm] _ Espessura Tubo Garganta:%.2f[
    mm] _ Raz o Bocal:%.2f _ \n rea Abertura:%.2f[mm] _
    Comprimento M ximo Regulagem:%.2f[mm] _ Press o M xima
    Opera o%.2f[Pa] _ \n Passo Abertura: %.2f[mm] _
    Di metro Bico:%.2f[mm] _ Massa Cilindro:%.2f[kg] \n',
    modelo,raio_garganta*1000,espessura_tubo_garganta*1000,
    razaobocal_maxima,area_abertura_parede_bocal*1000,
    comprimentoabertura_maxima*1000,pressao_maxima_operacao,
    passo_abertura*1000,diamentro_furo_bico_gicle*1000,
    massa_cilindro);
388 str5=sprintf('Raz o Mistura x Temperatura [Celsius]]');
389 str5_1=sprintf('%.d_Temperatura_adiabatica_razao',modelo);
390 title(sprintf('%s',str5))
391 legend('Temperatura Adiabatica C2.2592H4.8440','Temperatura
    Adiabatica Media Componentes')
392 xlabel('Razoes (Mistura)')
393 ylabel({'Temperatura Adiab tica';'de Chama [Celsius]'})
394 xticks(0:0.025:1)
395 legend('boxoff')
396
397 %saveas(gcf,sprintf('%s.jpg',str5_1))
398
399 subplot(2,1,2)
400 plot(razao_mistura(:,2),Temp_adiabatica(2,:)+273)
401 hold on

```

```

402 plot(razao_mistura(:,2),Temp_adiabatica(3,:)+273)
403 hold on
404 plot(razao_mistura(:,2),Temp_adiabatica(4,:)+273)
405 hold on
406 plot(razao_mistura(:,2),Temp_adiabatica(5,:)+273)
407 hold on
408 plot(razao_mistura(:,2),Temp_adiabatica(6,:)+273)
409 hold on
410 plot(razao_mistura(:,2),Temp_adiabatica(7,:)+273)
411 hold on
412 grid
413 %str6=sprintf('%d Raz o Mistura x Temperatura Adiab tica
    de Chama [Celsius] \n _ Raio Garganta:%.2f[mm] _ Espessura
    Tubo Garganta:%.2f[mm] _ Raz o Bocal:%.2f _ \n rea
    Abertura:%.2f[mm] _ Comprimento M ximo Regulagem:%.2f[mm]
    _ Press o M xima Opera o%.2f[Pa] _ \n Passo Abertura
    : %.2f[mm] _ Di metro Bico:%.2f[mm] _ Massa Cilindro:%.2f
    [kg] \n',modelo,raio_garganta*1000,espessura_tubo_garganta
    *1000,razaobocal_maxima,area_abertura_parede_bocal*1000,
    comprimentoabertura_maxima*1000,pressao_maxima_operacao,
    passo_abertura*1000,diamentro_furo_bico_gicle*1000,
    massa_cilindro);
414 str6=sprintf('Raz o Mistura x Temperatura Adiab tica de
    Chama [Celsius] ');
415 str6_1=sprintf('%d_Temperatura_adiabatica_razao_componentes'
    ,modelo);
416 title(sprintf('%s',str6))
417 legend('C4H10','C3H8','C4H8','C3H6','Temperatura Adiabatica
    C2.2592H4.8440','Temperatura Adiabatica Media Componentes'
    )
418 xlabel('Razoes (Mistura)')
419 ylabel({'Temperatura Adiabatica';'de Chama [Celsius]'})
420 xticks(0:0.025:1)
421 legend('boxoff')
422
423 saveas(gcf,sprintf('%s.png',str6_1))
424
425

```

```

426 %
-----
427 %
-----
428 %
-----
429
430 tempoconsumo = [tempo_consumo(5000) tempo_consumo(10000)
    tempo_consumo(15000) tempo_consumo(20000) tempo_consumo
    (25000) tempo_consumo(30000) tempo_consumo(35000)
    tempo_consumo(40000) tempo_consumo(45000) tempo_consumo
    (50000) tempo_consumo(55000) tempo_consumo(60000)
    tempo_consumo(65000) tempo_consumo(70000) tempo_consumo
    (75000) tempo_consumo(80000) tempo_consumo(85000)
    tempo_consumo(90000) tempo_consumo(95000) tempo_consumo
    (100000)];
431 %tempoconsumo = [tempo_consumo(5000) tempo_consumo(10000)
    tempo_consumo(15000) tempo_consumo(20000) tempo_consumo
    (25000)];
432 c = 5000:5000:100000;
433 figure(6)
434 subplot(2,1,1)
435 bar(c,tempoconsumo);
436 barvalues([], '%.2f');
437 %str8=sprintf('%d Press o O pera o [Pa] x Tempo Consumo[h]
    \n _ Raio Garganta: %.2f[mm] _ Espessura Tubo Garganta: %.2
    f[mm] _ Raz o Bocal: %.2f _ \n rea Abertura: %.2f[mm] _
    Comprimento M ximo Regulagem: %.2f[mm] _ Press o M xima
    O pera o %.2f[Pa] _ \n Passo Abertura: %.2f[mm] _
    Di metro Bico: %.2f[mm] _ Massa Cilindro: %.2f[kg] \n',
    modelo,raio_garganta*1000,espessura_tubo_garganta*1000,
    razaobocal_maxima,area_abertura_parede_bocal*1000,
    comprimentoabertura_maxima*1000,pressao_maxima_operacao,
    passo_abertura*1000,diamentro_furo_bico_gicle*1000,
    massa_cilindro);

```

```

438 str8=sprintf('Press o Opera o [Pa] x Tempo Consumo[h]
      Di metro Bico:%.2f[mm] _ Massa Cilindro:%.2f[kg] \n',
      diametro_furo_bico_gicle*1000, massa_cilindro);
439 str8_1=sprintf('%d_Pressao_Operacao_Tempo Consumo', modelo);
440 title(sprintf('%s', str8))
441 ax = gca;
442 ax.FontSize = 9;
443 %set(gca, 'xticklabel', {'5', '10', '15', '20', '25'})
444 %set(gca, 'xticklabel
      ', {'5', '10', '15', '20', '25', '30', '35', '40', '45', '50', '55', '60', '65', '70

445 xlabel('Press o Opera o [kPa]')
446 ylabel('Tempo Consumo [h]')
447
448 box off
449
450 subplot(2,1,2)
451 fluxomassicoprimary = [fluxo_massico_primario(5000)*3600
      fluxo_massico_primario(10000)*3600 fluxo_massico_primario
      (15000)*3600 fluxo_massico_primario(20000)*3600
      fluxo_massico_primario(25000)*3600 fluxo_massico_primario
      (30000)*3600 fluxo_massico_primario(35000)*3600
      fluxo_massico_primario(40000)*3600 fluxo_massico_primario
      (45000)*3600 fluxo_massico_primario(50000)*3600
      fluxo_massico_primario(55000)*3600 fluxo_massico_primario
      (60000)*3600 fluxo_massico_primario(65000)*3600
      fluxo_massico_primario(70000)*3600 fluxo_massico_primario
      (75000)*3600 fluxo_massico_primario(80000)*3600
      fluxo_massico_primario(85000)*3600 fluxo_massico_primario
      (90000)*3600 fluxo_massico_primario(95000)*3600
      fluxo_massico_primario(100000)*3600];
452 %fluxomassicoprimary = [fluxo_massico_primario(5000)*3600
      fluxo_massico_primario(10000)*3600 fluxo_massico_primario
      (15000)*3600 fluxo_massico_primario(20000)*3600
      fluxo_massico_primario(25000)*3600];
453 bar(c, fluxomassicoprimary)
454 barvalues([], '%.2f');
455 %str9=sprintf('%d Press o Opera o [Pa] x Fluxo Massico
      Primario[g/s] \n _ Raio Garganta:%.2f[mm] _ Espessura Tubo

```



```

    Garganta:%.2f[mm] _ Raz o Bocal:%.2f _ \n rea Abertura
: %.2f[mm] _ Comprimento M ximo Regulagem:%.2f[mm] _
Press o M xima Opera o%.2f[Pa] _ \n Passo Abertura:
%.2f[mm] _ Di metro Bico:%.2f[mm] _ Massa Cilindro:%.2f[
kg] \n',modelo,raio_garganta*1000,espessura_tubo_garganta
*1000,razaobocal_maxima,area_abertura_parede_bocal*1000,
comprimentoabertura_maxima*1000,pressao_maxima_operacao,
passo_abertura*1000,diamentro_furo_bico_gicle*1000,
massa_cilindro);
456 str9=sprintf('Press o Opera o [Pa] x Fluxo Massico
    Primario[kg/h] ');
457 str9_1=sprintf('%d_Pressao_Operacao_Fluxo_Massico_Primario',
    modelo);
458 title(sprintf('%s',str9))
459 ax = gca;
460 ax.FontSize = 9;
461
462
463
464 %A an lise completa de qualquer escoamento envolve v rios
    fen menos a respeito do movimento das part culas ao
    longo de diferentes meios. Todos os conceitos envolvidos
    ao comportamento de um flu do devem ser levados em
    considera o. Compressibilidade, vorticidade, camada
    limite, perda de carga em tubula es devido a efeitos
    dissipativos do transporte do fluido em quest o ,
    velocidade, temperatura e press o s o objetos de v rios
    estudos nesta rea ; ao longo do desenvolvimento deste
    trabalho levar-se- em considera o tudo aquilo que
    relevante para o desenvolvimento de um queimador
    atmosf rico com controle de temperatura, assim como as
    considera es necess rias para a aplica o em fornos
    de forjamento de cutelaria.
465 %Nesta se o descrever-se- teorias que servem de base
    para a an lise da compressibilidade dos gases ao longo
    dos sistemas que comp em o queimador atmosf rico;
    acelera o , desacelera o e a eleva o ou
    atenua o da press o total do ao longo do escoamento.
466

```

```

467 set(gca,'xticklabel',{'5','10','15','20','25','30','35','40',
    '45','50','55','60','65','70','75','80','85','90','95','
    100'})
468 xlabel('Press o Opera o [KPa]')
469 ylabel('Fluxo M ssico Primario1 [kg/h]')
470
471 box off
472
473 saveas(gcf,sprintf('%s.png',str9_1))
474
475
476 %
    -----
477 %
    -----
478 %
    -----

479
480
481 %figure(6)
482 %subplot(2,1,1)
483 %plot(1000*abertura,razao_mistura(:,2))
484 %grid
485 %str3=sprintf('%d Abertura [mm] x Raz o Mistura \n _ Raio
    Garganta:%.2f[mm] _ Espessura Tubo Garganta:%.2f[mm] _
    Raz o Bocal:%.2f _ \n rea Abertura:%.2f[mm] _
    Comprimento M ximo Regulagem:%.2f[mm] _ Press o M xima
    Opera o %.2f[Pa] _ \n Passo Abertura: %.2f[mm] _
    Di metro Bico:%.2f[mm] _ Massa Cilindro:%.2f[kg] \n',
    modelo,raio_garganta*1000,espessura_tubo_garganta*1000,
    razaobocal_maxima,area_abertura_parede_bocal*1000,
    comprimentoabertura_maxima*1000,pressao_maxima_operacao,
    passo_abertura*1000,diamentro_furo_bico_gicle*1000,
    massa_cilindro);
486 %str8=sprintf(' Abertura [mm] x Raz o Mistura ');

```

```

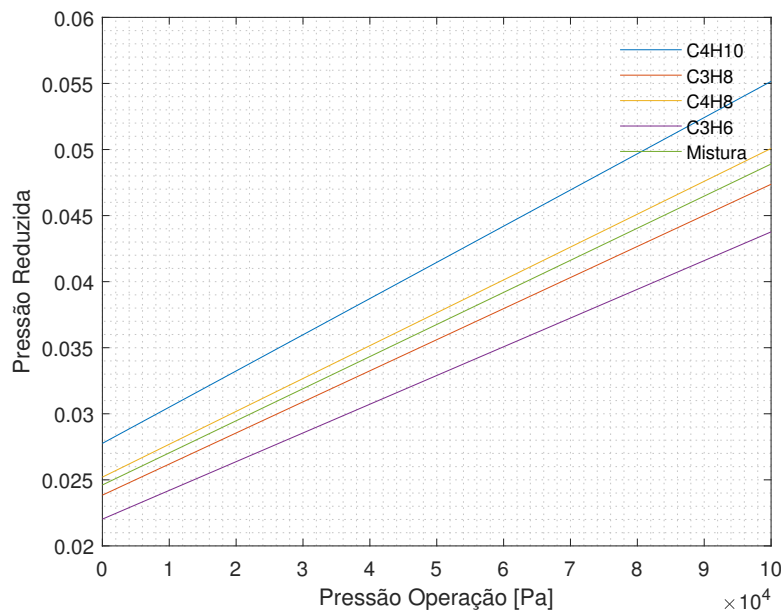
487 %str8_1=sprintf('%d Controle Razao _ %.2f _ %.2f %.2f _ %.2f
    _ %.2f _ %.2f _ %.2f _ %.2f_ %.2f ',modelo,raio_garganta
    *1000,espessura_tubo_garganta*1000,razaobocal_maxima,
    area_abertura_parede_bocal*1000,comprimentoabertura_maxima
    *1000,pressao_maxima_operacao,passo_abertura*1000,
    diamentro_furo_bico_gicle*1000,massa_cilindro);
488 %title(sprintf('%s',str8))
489 %ylabel('Razoes (Mistura)')
490 %xlabel('Abertura do controle de entrada de ar[mm]')
491 %yticks(0:0.05:1)
492 %xticks(0:10:250)
493 %legend('Raz es Mistura x Abertura do controle de entrada de
    ar')
494 %legend('boxoff')
495
496 %saveas(gcf,sprintf('%s.jpg',str3_1))
497
498
499
500 %subplot(2,1,2)
501 %plot(1000*abertura,diff(Temp_adiabatica(6,:)+273))
502 %hold on
503 %plot(1000*abertura,diff(Temp_adiabatica(7,:)+273))
504 %grid
505 %str4=sprintf('%d Abertura [mm] x Temperatura [Celsius]] \n
    _ Raio Garganta:%.2f[mm] _ Espessura Tubo Garganta:%.2f[mm
    ] _ Raz o Bocal:%.2f _ \n rea Abertura:%.2f[mm] _
    Comprimento M ximo Regulagem:%.2f[mm] _ Press o M xima
    Opera o%.2f[Pa] _ \n Passo Abertura: %.2f[mm] _
    Di metro Bico:%.2f[mm] _ Massa Cilindro:%.2f[kg] \n',
    modelo,raio_garganta*1000,espessura_tubo_garganta*1000,
    razaobocal_maxima,area_abertura_parede_bocal*1000,
    comprimentoabertura_maxima*1000,pressao_maxima_operacao,
    passo_abertura*1000,diamentro_furo_bico_gicle*1000,
    massa_cilindro);
506 %str9=sprintf(' Abertura [mm] x Temperatura [Celsius]] ');
507 %str9_1=sprintf('%d Controle Temperatura _ %.2f _ %.2f %.2f
    _ %.2f _ %.2f _ %.2f _ %.2f _ %.2f_ %.2f ',modelo,
    raio_garganta*1000,espessura_tubo_garganta*1000,

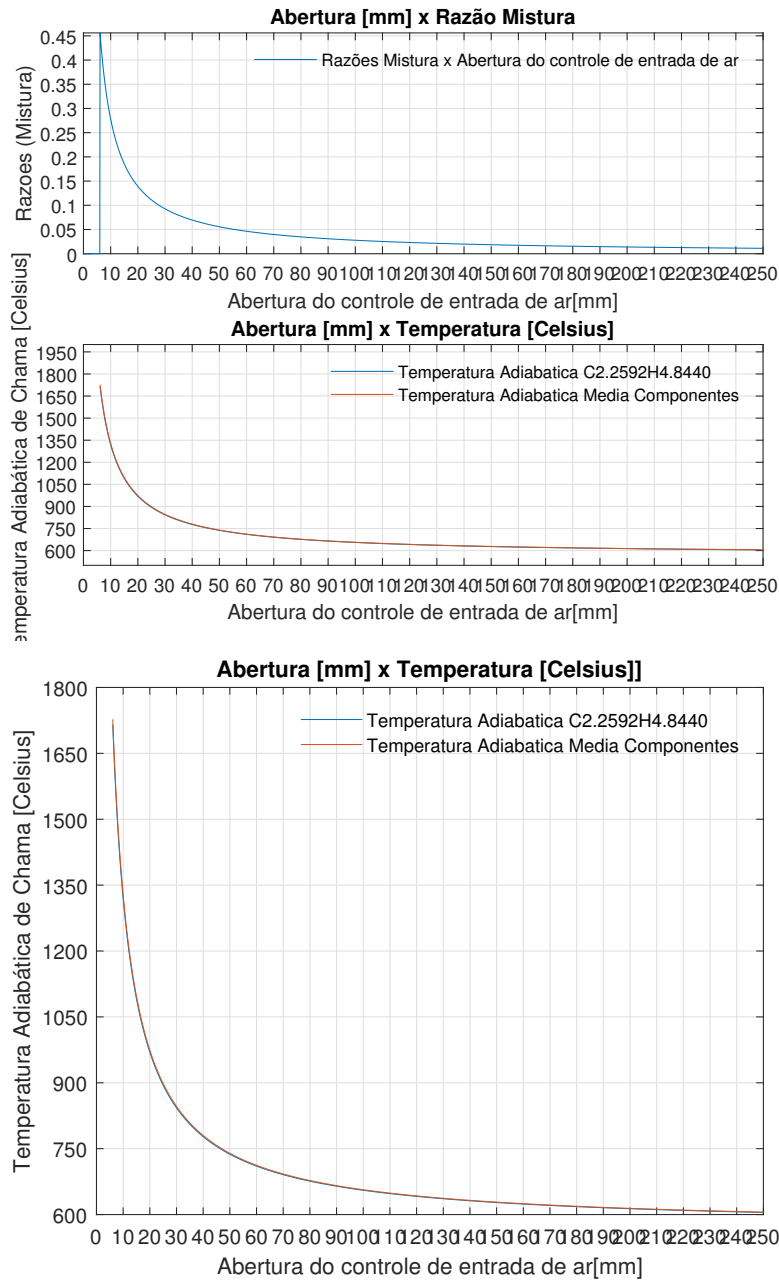
```

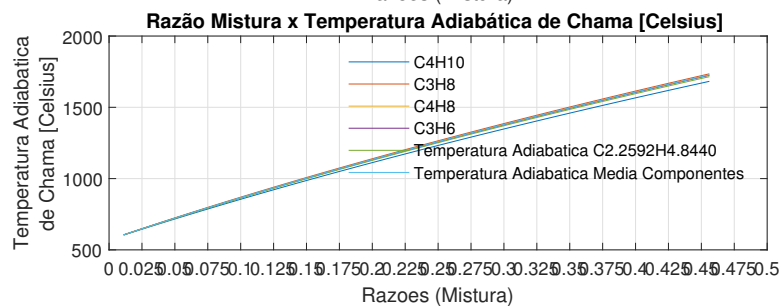
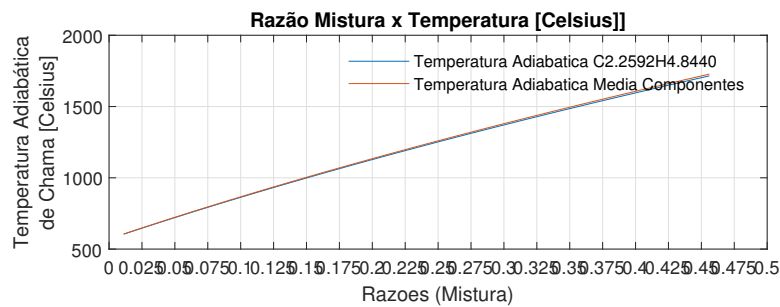
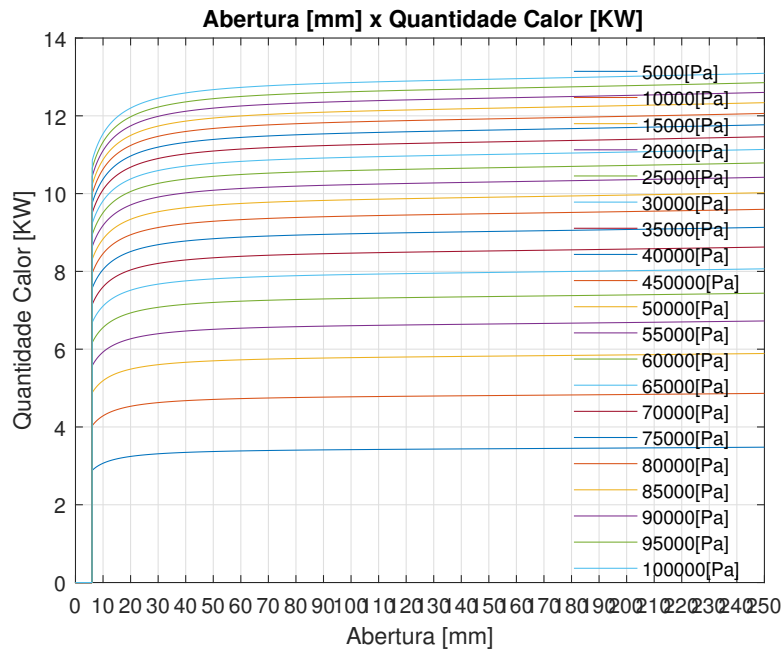
```

    razaobocal_maxima,area_abertura_parede_bocal*1000,
    comprimento_abertura_maxima*1000,pressao_maxima_operacao,
    passo_abertura*1000,diamentro_furo_bico_gicle*1000,
    massa_cilindro);
508 %title(sprintf('%s',str9))
509 %xlabel('Abertura do controle de entrada de ar[mm]')
510 %ylabel('Temperatura Adiab tica de Chama [Celsius]')
511 %yticks(0:250:2500)
512 %xticks(0:10:250)
513 %legend('Temperatura Adiabatica C2.2592H4.8440','Temperatura
    Adiabatica Media Componentes')
514 %legend('boxoff')
515
516 %saveas(gcf,sprintf('%s.jpg',str4_1))
517
518 %saveas(gcf,sprintf('%s.jpg',str9_1))
519
520 %figure(8)
521 %mesh(quantidade_calor_total)

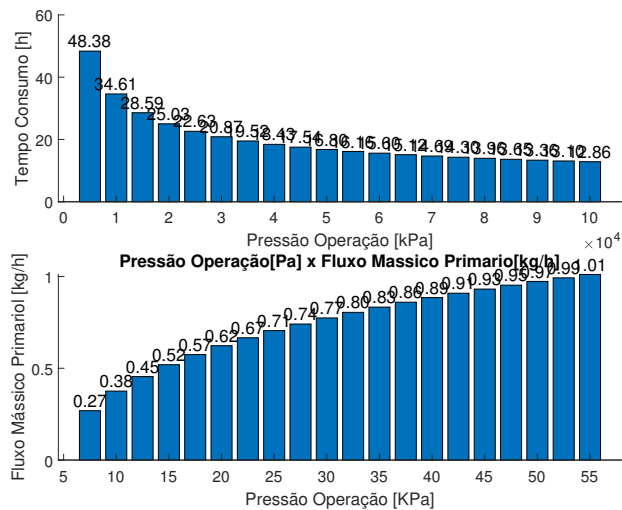
```







Pressão Operação[Pa] x Tempo Consumo[h] Diâmetro Bico:0.80[mm] Massa Cilindro:13.00[kg]



C.2 Função: Calculo Temperatura Adiabática de Chama - Hidrocarbonetos - Mistura pobre ou estequiométrica

Listing C.2 – Código 2

```

1 %clear all,
2 %close all,
3 %clc,
4
5 %x=1;      %CxHy
6 %y=4;      %CxHy
7 %T_inicial_gas=298;
8 %passo_mist=0.01;
9 %passo_temp_range=100;
10 %temp_final_range=2500;
11 %ru = 8.31447; %[kJ/kMol.K] constante universal dos gases
12
13
14 function [Temp_adiabatica, entalp_reagente, entalp_produto] =
    temp_adiabatica(x,y,T_inicial_gas,passo_mist,
    passo_temp_range,temp_final_range,molecula,razaoest,
    razao_mistura,ru,hstandar298_data)
15
16
17
18
19 %Tabela A13 Turns - Calculo de h^0
20 %C0
21
22 %Constantes para calculos de CP, h_0[], s_0[]
    const_Molecula_A13_1000_5000 = [a1 a2 a3 a4 a5 a6 a7]
23 const_O2_A13_1000_5000 = [0.03697578*10^2
    0.06135197*10^-2 -0.12588420*10^-6 0.01775281*10^-9
    -0.11364354*10^-14 -0.12339301*10^4 0.03189165*10^2];
24 const_CO_A13_1000_5000 = [0.0302507*10^2
    0.144226885*10^-2 -0.05630827*10^-5 0.10185813*10^-9
    -0.06910951*10^-13 -0.14268340*10^5 0.061082017*10^2];
25 const_CO2_A13_1000_5000 = [0.04453623*10^2
    0.03140168*10^-1 -0.12784105*10^-5 0.02393996*10^-8
    -0.16690333*10^-13 -0.04896696*10^6 -0.09553959*10^1];

```

```

26 const_H2O_A13_1000_5000 = [0.02672145*10^2
    0.03056293*10^-1 -0.08730260*10^-5 0.12009964*10^-9
    -0.06391618*10^-13 -0.02989921*10^6 0.06862817*10^2];
27 const_N2_A13_1000_5000 = [0.02926640*10^2
    0.14879768*10^-2 -0.05684760*10^-5 0.10097038*10^-9
    -0.06753351*10^-13 -0.09227977*10^4 0.05980528*10^2];
28 const_C4H10_NASA_1000_5000 = [];
29 const_C3H8_NASA_1000_5000 = [];
30 const_C4H8_NASA_1000_5000 = [];
31 const_C3H6_NASA_1000_5000 = [];
32
33
34 %calculo Cp ( Table A13 - Turns ou Chemkin pg 9)
35 %formula geral cp = ru*(a1 + a2*T + a3*T^2 + a4*T^3 + a5*T^4)
36
37 %cp_CO2 = ru*(const_CO2_A13_1000_5000(1) +
    const_CO2_A13_1000_5000(2)*T + const_CO2_A13_1000_5000(3)*
    T^2 + const_CO2_A13_1000_5000(4)*T^3 +
    const_CO2_A13_1000_5000(5)*T^4)
38 %cp_H2O = ru*(const_H2O_A13_1000_5000(1) +
    const_H2O_A13_1000_5000(2)*T + const_H2O_A13_1000_5000(3)*
    T^2 + const_H2O_A13_1000_5000(4)*T^3 +
    const_H2O_A13_1000_5000(5)*T^4)
39 %cp_O2 = ru*(const_O2_A13_1000_5000(1) +
    const_O2_A13_1000_5000(2)*T + const_O2_A13_1000_5000(3)*T
    ^2 + const_O2_A13_1000_5000(4)*T^3 +
    const_O2_A13_1000_5000(5)*T^4)
40 %cp_N2 = ru*(const_N2_A13_1000_5000(1) +
    const_N2_A13_1000_5000(2)*T + const_N2_A13_1000_5000(3)*T
    ^2 + const_N2_A13_1000_5000(4)*T^3 +
    const_N2_A13_1000_5000(5)*T^4)
41
42
43
44 T_range = 0:passo_temp_range:temp_final_range; % 1K a 2500K
    Temperatura
45 cp_CO2 = [];
46 cp_H2O = [];
47 cp_O2 = [];

```



```

48 cp_N2 = [];
49 cp_CO2_fit = [];
50 cp_H2O_fit = [];
51 cp_O2_fit = [];
52 cp_N2_fit = [];
53
54 %
    -----
55 % Cálculo Cp em função da temperatura no intervalo de 0 a
    temp_final_range com passos de passo_temp_range
56 %
    -----

57 for j=1:length(T_range)
58     T = T_range(j);
59     T_fit = T_range(j);
60     cp_CO2(j) = ru*(const_CO2_A13_1000_5000(1) +
        const_CO2_A13_1000_5000(2)*T + const_CO2_A13_1000_5000(3)*
        T^2 + const_CO2_A13_1000_5000(4)*T^3 +
        const_CO2_A13_1000_5000(5)*T^4);
61     cp_H2O(j) = ru*(const_H2O_A13_1000_5000(1) +
        const_H2O_A13_1000_5000(2)*T + const_H2O_A13_1000_5000(3)*
        T^2 + const_H2O_A13_1000_5000(4)*T^3 +
        const_H2O_A13_1000_5000(5)*T^4);
62     cp_O2(j) = ru*(const_O2_A13_1000_5000(1) +
        const_O2_A13_1000_5000(2)*T + const_O2_A13_1000_5000(3)*T
        ^2 + const_O2_A13_1000_5000(4)*T^3 +
        const_O2_A13_1000_5000(5)*T^4);
63     cp_N2(j) = ru*(const_N2_A13_1000_5000(1) +
        const_N2_A13_1000_5000(2)*T + const_N2_A13_1000_5000(3)*T
        ^2 + const_N2_A13_1000_5000(4)*T^3 +
        const_N2_A13_1000_5000(5)*T^4);
64
65     cp_CO2_fit(j) = ru*(const_CO2_A13_1000_5000(1) +
        const_CO2_A13_1000_5000(2)*T_fit + const_CO2_A13_1000_5000
        (3)*T_fit^2 + const_CO2_A13_1000_5000(4)*T_fit^3 +
        const_CO2_A13_1000_5000(5)*T_fit^4);

```

```

66 cp_H2O_fit(j) = ru*(const_H2O_A13_1000_5000(1) +
    const_H2O_A13_1000_5000(2)*T_fit + const_H2O_A13_1000_5000
    (3)*T_fit^2 + const_H2O_A13_1000_5000(4)*T_fit^3 +
    const_H2O_A13_1000_5000(5)*T_fit^4);
67 cp_O2_fit(j) = ru*(const_O2_A13_1000_5000(1) +
    const_O2_A13_1000_5000(2)*T_fit + const_O2_A13_1000_5000
    (3)*T_fit^2 + const_O2_A13_1000_5000(4)*T_fit^3 +
    const_O2_A13_1000_5000(5)*T_fit^4);
68 cp_N2_fit(j) = ru*(const_N2_A13_1000_5000(1) +
    const_N2_A13_1000_5000(2)*T_fit + const_N2_A13_1000_5000
    (3)*T_fit^2 + const_N2_A13_1000_5000(4)*T_fit^3 +
    const_N2_A13_1000_5000(5)*T_fit^4);
69
70 end
71
72
73 %
    -----

74 % -----  Calculo Temperatura Adiab tica de Chama / 10
    itera es -----
75 %
    -----

76     Temp_adiabatica = [];
77
78     %razaomist = 0:passo_mist:1;
79     %for s=1:1:length(razao_mistura(:,1))
80
81 for n=1:length(razao_mistura(:,2))
82     a = (x+(y/4))/razao_mistura(n,2) ;
83     b = x ;
84     d = y/2;
85     f = ((1-razao_mistura(n,2))/razao_mistura(n,2)*(x+(y/4)))
        ;
86
87     %N_CxHy_reag = 1;
88     %N_O2_reag = a;
89     %N_N2_reag = a*3.76;

```

```

90     %N_CO2_prod = b;
91     %N_H2O_prod = d;
92     %N_O2_prod = f;
93     %N_N2_prod = 3.76*a;
94
95     %N_mol_reag [CxHy O2 N2]
96     N_mol_reag = [1 a (a*3.76)];
97     %N_mol_prod [CO2 H2O O2 N2]
98     N_mol_prod = [b d f (a*3.76)];
99
100
101
102
103
104     temp_est = 1:1:10; % Representa o numero de itera es at
        encontrar o valor correto, ou seja, at convergir o
        resultado
105     temp_est(1,1) = 2100; %Chute/Estimativa de temperatura de
        chama Inicial
106     entalp_r = [];
107     entalp_p = [];
108     for m=2:1:length(temp_est)
109         T = (temp_est(m-1)+T_inicial_gas)/2;
110
111         cp_CO2_ = ru*(const_CO2_A13_1000_5000(1) +
            const_CO2_A13_1000_5000(2)*T + const_CO2_A13_1000_5000(3)*
            T^2 + const_CO2_A13_1000_5000(4)*T^3 +
            const_CO2_A13_1000_5000(5)*T^4);
112         cp_H2O_ = ru*(const_H2O_A13_1000_5000(1) +
            const_H2O_A13_1000_5000(2)*T + const_H2O_A13_1000_5000(3)*
            T^2 + const_H2O_A13_1000_5000(4)*T^3 +
            const_H2O_A13_1000_5000(5)*T^4);
113         cp_O2_ = ru*(const_O2_A13_1000_5000(1) +
            const_O2_A13_1000_5000(2)*T + const_O2_A13_1000_5000(3)*T
            ^2 + const_O2_A13_1000_5000(4)*T^3 +
            const_O2_A13_1000_5000(5)*T^4);
114         cp_N2_ = ru*(const_N2_A13_1000_5000(1) +
            const_N2_A13_1000_5000(2)*T + const_N2_A13_1000_5000(3)*T
            ^2 + const N2 A13 1000 5000(4)*T^3 +

```

```

const_N2_A13_1000_5000(5)*T^4);
115
116 cp_CO2_fit_ = ru*(const_CO2_A13_1000_5000(1) +
    const_CO2_A13_1000_5000(2)*T_fit + const_CO2_A13_1000_5000
    (3)*T_fit^2 + const_CO2_A13_1000_5000(4)*T_fit^3 +
    const_CO2_A13_1000_5000(5)*T_fit^4);
117 cp_H2O_fit_ = ru*(const_H2O_A13_1000_5000(1) +
    const_H2O_A13_1000_5000(2)*T_fit + const_H2O_A13_1000_5000
    (3)*T_fit^2 + const_H2O_A13_1000_5000(4)*T_fit^3 +
    const_H2O_A13_1000_5000(5)*T_fit^4);
118 cp_O2_fit_ = ru*(const_O2_A13_1000_5000(1) +
    const_O2_A13_1000_5000(2)*T_fit + const_O2_A13_1000_5000
    (3)*T_fit^2 + const_O2_A13_1000_5000(4)*T_fit^3 +
    const_O2_A13_1000_5000(5)*T_fit^4);
119 cp_N2_fit_ = ru*(const_N2_A13_1000_5000(1) +
    const_N2_A13_1000_5000(2)*T_fit + const_N2_A13_1000_5000
    (3)*T_fit^2 + const_N2_A13_1000_5000(4)*T_fit^3 +
    const_N2_A13_1000_5000(5)*T_fit^4);
120
121 T_ad = (((N_mol_reag(1)*hstandar298_data(molecula))-
    N_mol_prod(1)*hstandar298_data(7))-(N_mol_prod(2)*
    hstandar298_data(8))-(N_mol_prod(3)*hstandar298_data(11))
    -(N_mol_prod(4)*hstandar298_data(9))) + (T_inicial_gas*((
    N_mol_prod(1)*cp_CO2_)+(N_mol_prod(2)*cp_H2O_)+(N_mol_prod
    (3)*cp_O2_)+(N_mol_prod(4)*cp_N2_))))/(((N_mol_prod(1)*
    cp_CO2_)+(N_mol_prod(2)*cp_H2O_)+(N_mol_prod(3)*cp_O2_)+(
    N_mol_prod(4)*cp_N2_));
122
123
124
125 entalp_reag = (N_mol_reag(1)*hstandar298_data(molecula));
126 entalp_prod = N_mol_prod(1)*hstandar298_data(7) + N_mol_prod
    (2)*hstandar298_data(8)+ N_mol_prod(3)*hstandar298_data
    (11) + N_mol_prod(4)*hstandar298_data(9)+T_ad*(N_mol_prod
    (1)*cp_CO2_+N_mol_prod(2)*cp_H2O_+N_mol_prod(3)*cp_O2_+
    N_mol_prod(4)*cp_N2_)-T_inicial_gas*(N_mol_prod(1)*cp_CO2_
    +N_mol_prod(2)*cp_H2O_+N_mol_prod(3)*cp_O2_+N_mol_prod(4)*
    cp_N2_);

```

127

```
128 %T_ad_ch4 = ((N_mol_reag(1)*(-74831) - N_mol_prod(1)
      *(-393546) - N_mol_prod(2)*(-241845) - N_mol_prod(3)*(0) -
      N_mol_prod(4)*(0)) +( T_inicial_gas*(N_mol_prod(1)*56.21+
      N_mol_prod(2)*43.87+N_mol_prod(3)*(0)+N_mol_prod(4)*33.71)
      ))/((N_mol_prod(1)*56.21+N_mol_prod(2)*43.87+N_mol_prod(3)
      *(0)+N_mol_prod(4)*33.71))
129
130 %T_ad_fit = ((N_mol_reag(1)*hstandar298_fit(10) - N_mol_prod
      (1)*hstandar298_fit(7) - N_mol_prod(2)*hstandar298_fit(8)
      - N_mol_prod(3)*hstandar298_fit(11) - N_mol_prod(4)*
      hstandar298_fit(9)) + (T_inicial_gas*(N_mol_prod(1)*
      cp_CO2_fit(i/passo_temp_range)+N_mol_prod(2)*cp_H2O_fit(i/
      passo_temp_range)+N_mol_prod(3)*cp_O2_fit(i/
      passo_temp_range)+N_mol_prod(4)*cp_N2_fit(i/
      passo_temp_range))))/((N_mol_prod(1)*cp_CO2_fit(i/
      passo_temp_range)+N_mol_prod(2)*cp_H2O_fit(i/
      passo_temp_range)+N_mol_prod(3)*cp_O2_fit(i/
      passo_temp_range)+N_mol_prod(4)*cp_N2_fit(i/
      passo_temp_range)))
131
132 temp_est(m) = T_ad;
133 entalp_r(m) = entalp_reag;
134 entalp_p(m) = entalp_prod;
135 end
136 Temp_adiabatica(n) = temp_est(end);
137 entalp_reagente(n) = entalp_r(end);
138 entalp_produto(n) = entalp_p(end);
139 end
140
141
142 end
```

C.3 Função: Fator de Compressibilidade baseado em Pressão Reduzida

Listing C.3 – Código 2

```

1  %clear all,
2  %close all,
3  %clc,
4
5  %molecula = 10;
6  %pressao_maxima_operacao = 10000;
7  %passo_pressao_operacao = 1; %[Pa}
8  %pressao_range = 0:passo_pressao_operacao:
    pressao_maxima_operacao;
9
10 % ----- ATEN  O -----
11 %LER OBSERVA ES PAGINA 138 LIVRO TERMODIN MICA DO CENGEL
12 %Para press es muito baixas ( $Pr \ll 1$ ) os gases se comportam
    como gases ideais independentemente da temperatura
13 %A temperaturas altas ( $Tr > 2$ ), o comportamento ideal do gas
    pode ser admitido com boa exatid o , independente da
    press o (exceto quando  $Pr \gg 1$ )
14 % O desvio de comportamento de g s ideal maior pr ximo
    da vizinhan a do ponto cr tico , ou seja, o erro
    assoxiado maior nessa regioao
15
16
17
18 function [pressao_reduzida, temperatura_reduzida,
    pressao_range1] = QATM_2_fator_compressibilidade(molecula,
    pressao_maxima_operacao, passo_pressao_operacao, percentmist
    , temp_critica, pressao_critica, volume_especifico_critico,
    const, pressao_atmosferica)
19
20 %Moleculas [ 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
    11]
21 %Moleculas [Mistura C4H10 C3H8 C4H8 C3H6 CO CO2 H2O N2 CH4 O2
    ]
22
23

```

```
24
25 pressao_range1 = pressao_atmosferica:passo_pressao_operacao:
    pressao_maxima_operacao+pressao_atmosferica;
26 %temperatura_range = 0:623/((pressao_maxima_operacao*
    passo_pressao_operacao)):350;
27 temperatura_range = 0:1:350;
28 volume_range_crit = 0:1:1;
29 pressao_reduzida = [];
30 temperatura_reduzida = [];
31 volume_espec_reduzido = [];
32
33 for i=1:passo_pressao_operacao:length(pressao_range1)
34
35     pressao_reduzida(i) = pressao_range1(i)/pressao_critica(
        molecula);
36
37     %volume_espec_reduzido(i) = volume_range_crit(i)/
        volume_especifico_critico(molecula);
38 end
39
40 for j=1:1:length(temperatura_range)
41     temperatura_reduzida(j) = temperatura_range(j)/
        temp_critica(molecula);
42 end
43
44
45 end
```

C.4 Função: Cálculo Propriedades C_p, C_v, K

Listing C.4 – Código 2

```

1 %clear all;
2 %clc;
3 %ru = 8.31447; %[kJ/kMol.K] constante universal dos gases
4 %percentmist = [1 0.2333 0.1434 0.3156 0.3047 1 1 1 1 1]; %
    Porcentagens do total da mistura GLP Fonte: Fog s
5 %massamolar = [50.42 58 44 56 42 28 44 18 28 16 32 28.84];
    %[kg/kMol] Massa molar
6 %const_gas = [ru/massamolar(1) ru/massamolar(2) ru/massamolar
    (3) ru/massamolar(4) ru/massamolar(5) ru/massamolar(6) ru/
    massamolar(7) ru/massamolar(8) ru/massamolar(9) ru/
    massamolar(10) ru/massamolar(11)]; %[kJ/kg.K]
7 %pressao_maxima_operacao = 10000; %[Pa] %Press o maxima de
    opera o do g s antes da combust o , no escoamento
    entre bocal,garganta e difusor
8 %passo_pressao_operacao = 1; %[Pa}
9 %pressao_range = 0:passo_pressao_operacao:
    pressao_maxima_operacao;
10 %fluxo_massico_primario = 1;
11 %molecula = 1;
12 %T_inicial_gas=273;
13 %passo_temp_range=1;
14 %temp_final_range=2772;
15 %T_range = T_inicial_gas:passo_temp_range:temp_final_range; %
    1K a 2500K Temperatura
16 %volum_specif_mol = [((0.263*percentmist(2))+(0.2*percentmist
    (3))+(0.2408*percentmist(4))+(0.1846*percentmist(5)))
    0.263 0.2 0.2408 0.1846 0 0 0 0 0 0];% [L/mol] Phase
    Change Data %Fonte: National Institute of Standarts and
    Technology
17 %volum_specif_kg = [(volum_specif_mol(1)/massamolar(1)) (
    volum_specif_mol(2)/massamolar(2)) (volum_specif_mol(3)/
    massamolar(3)) (volum_specif_mol(4)/massamolar(4)) (
    volum_specif_mol(5)/massamolar(5)) 0 0 0 0 0.002364 0];% [
    m /kg] Phase Change Data %Fonte: National Institute of
    Standarts and Technology

```



```

19
20 function [vel_som_gas , cp_CO2 , cp_H2O , cp_O2 , cp_N2 , cv_CO2 , cv_H2O
    , cv_O2 , cv_N2 , cp_C4H10 , cp_C3H8 , cp_C4H8 , cp_C3H6 , cv_C4H10 ,
    cv_C3H8 , cv_C4H8 , cv_C3H6 , K_C4H10 , K_C3H8 , K_C4H8 , K_C3H6 ,
    K_mist , cp_mist , cv_mist , volum_specif_kg , volum_specif_mol ,
    temp_gas_frio_func_press_C4H10 ,
    temp_gas_frio_func_press_C3H8 ,
    temp_gas_frio_func_press_C4H8 ,
    temp_gas_frio_func_press_C3H6 ,
    temp_gas_frio_func_press_MISTURA , pressao] =
    QATM_2_Calculo_temp_Cp_Cv_K_Queima(passo_temp_range ,
    temp_final_range , pressao_maxima_operacao ,
    passo_pressao_operacao , T_inicial_gas , volum_specif_kg ,
    const_gas , percentmist , volum_specif_mol);
21
22 % ----- Dados dos Produtos e Reagentes e algumas outras
    mol culas
    -----
23 %
    -----
24
25 %Calculo Temperatura da Mistura em fun o da pressao de
    operacao (Assume-se
26 %g s ideal como provado pelo fator de compressibilidade
27 vel_som_gas = [];
28 pressao = 0:passo_pressao_operacao:pressao_maxima_operacao;
29 temp_gas_frio_func_press_C4H10 = [];
30 temp_gas_frio_func_press_C3H8 = [];
31 temp_gas_frio_func_press_C4H8 = [];
32 temp_gas_frio_func_press_C3H6 = [];
33 temp_gas_frio_func_press_mist = [];
34 for i=1:passo_pressao_operacao:length(pressao)
35
36     temp_gas_frio_func_press_C4H10(i) = (pressao(i)*
        volum_specif_kg(2))/((const_gas(2))); %[K/kg]
        temperatura por quilograma de g s

```

```

37     temp_gas_frio_func_press_C3H8(i) = (pressao(i)*
        volum_specif_kg(3))/((const_gas(3))); %[K/kg]
        temperatura por quilograma de g s
38     temp_gas_frio_func_press_C4H8(i) = (pressao(i)*
        volum_specif_kg(4))/((const_gas(4))); %[K/kg]
        temperatura por quilograma de g s
39     temp_gas_frio_func_press_C3H6(i) = (pressao(i)*
        volum_specif_kg(5))/((const_gas(5))); %[K/kg]
        temperatura por quilograma de g s
40     temp_gas_frio_func_press_MISTURA(i) = (
        temp_gas_frio_func_press_C4H10(i)*percentmist(2))+
        temp_gas_frio_func_press_C3H8(i)*percentmist(3))+
        temp_gas_frio_func_press_C4H8(i)*percentmist(4))+
        temp_gas_frio_func_press_C3H6(i)*percentmist(5)); %[K/
        kg] temperatura por quilograma de g s
41
42 end
43
44 %T_range = T_inicial_gas:passo_temp_range:temp_final_range; %
        1K a 2500K Temperatura
45
46
47 const_O2_A13_1000_5000 = [0.03697578*10^2
        0.06135197*10^-2 -0.12588420*10^-6 0.01775281*10^-9
        -0.11364354*10^-14 -0.12339301*10^4 0.03189165*10^2];
48 const_CO_A13_1000_5000 = [0.0302507*10^2
        0.144226885*10^-2 -0.05630827*10^-5 0.10185813*10^-9
        -0.06910951*10^-13 -0.14268340*10^5 0.061082017*10^2];
49 const_CO2_A13_1000_5000 = [0.04453623*10^2
        0.03140168*10^-1 -0.12784105*10^-5 0.02393996*10^-8
        -0.16690333*10^-13 -0.04896696*10^6 -0.09553959*10^1];
50 const_H2O_A13_1000_5000 = [0.02672145*10^2
        0.03056293*10^-1 -0.08730260*10^-5 0.12009964*10^-9
        -0.06391618*10^-13 -0.02989921*10^6 0.06862817*10^2];
51 const_N2_A13_1000_5000 = [0.02926640*10^2
        0.14879768*10^-2 -0.05684760*10^-5 0.10097038*10^-9
        -0.06753351*10^-13 -0.09227977*10^4 0.05980528*10^2];
52 const_C4H10_NASA_1000_5000 = [9.76991245*10^0
        2.54997210*10^-2 -9.14142932*10^-6 1.47328271*10^-9

```

```

-8.80800188*10^-14]; %Fonte NASA Technical Memorandum 4513
- Coefficients for calculating thermodynamisc and
transport properties of individual species
53 const_C3H8_NASA_1000_5000 = [6.66789363*10^0
2.06120214*10^-2 -7.36553027*10^-6 1.18440761*10^-7
-7.06953210*10^-14]; %Fonte NASA Technical Memorandum 4513
- Coefficients for calculating thermodynamisc and
transport properties of individual species
54 const_C4H8_NASA_1000_5000 = [8.02147991*10^0
2.26010707*10^-2 -8.31284033*10^-6 1.37803072*10^-9
-8.42175459*10^-14]; %Fonte NASA Technical Memorandum 4513
- Coefficients for calculating thermodynamisc and
transport properties of individual species
55 const_C3H6_NASA_1000_5000 = [7.94555710*10^0
1.74061678*10^-2 -6.25436463*10^-6 1.00975457*10^-9
-6.04488953*10^-14]; %Fonte NASA Technical Memorandum 4513
- Coefficients for calculating thermodynamisc and
transport properties of individual species
56
57
58
59 cp_C4H10 = [];
60 cp_C3H8 = [];
61 cp_C4H8 = [];
62 cp_C3H6 = [];
63 cp_CO2 = [];
64 cp_H2O = [];
65 cp_O2 = [];
66 cp_N2 = [];
67 cp_mistura = [];
68
69 cv_C4H10 = [];
70 cv_C3H8 = [];
71 cv_C4H8 = [];
72 cv_C3H6 = [];
73 cv_CO2 = [];
74 cv_H2O = [];
75 cv_O2 = [];
76 cv_N2 = [];

```

```

77 cv_mistura =[];
78
79 K_C4H10 = [];
80 K_C3H8 = [];
81 K_C4H8 = [];
82 K_C3H6 = [];
83 K_mist = [];
84 K_mistura =[];
85 %
      -----
86 % Calculo Cp em fun  o da temperatura no intervalo de 0 a
      temp_final_range com passos de passo_temp_range
87 %
      -----

88 temp_final_rangeeeee = 0:1:temp_final_range;
89 for j=1:length(temp_final_rangeeeee)
90 T = temp_final_rangeeeee(j);
91
92 cp_C4H10(j) = const_gas(2)*(const_C4H10_NASA_1000_5000(1) +
      const_C4H10_NASA_1000_5000(2)*T +
      const_C4H10_NASA_1000_5000(3)*T^2 +
      const_C4H10_NASA_1000_5000(4)*T^3 +
      const_C4H10_NASA_1000_5000(5)*T^4);
93 cp_C3H8(j) = const_gas(3)*(const_C3H8_NASA_1000_5000(1) +
      const_C3H8_NASA_1000_5000(2)*T + const_C3H8_NASA_1000_5000
      (3)*T^2 + const_C3H8_NASA_1000_5000(4)*T^3 +
      const_C3H8_NASA_1000_5000(5)*T^4);
94 cp_C4H8(j) = const_gas(4)*(const_C4H8_NASA_1000_5000(1) +
      const_C4H8_NASA_1000_5000(2)*T + const_C4H8_NASA_1000_5000
      (3)*T^2 + const_C4H8_NASA_1000_5000(4)*T^3 +
      const_C4H8_NASA_1000_5000(5)*T^4);
95 cp_C3H6(j) = const_gas(5)*(const_C3H6_NASA_1000_5000(1) +
      const_C3H6_NASA_1000_5000(2)*T + const_C3H6_NASA_1000_5000
      (3)*T^2 + const_C3H6_NASA_1000_5000(4)*T^3 +
      const_C3H6_NASA_1000_5000(5)*T^4);
96 cp_CO2(j) = const_gas(7)*(const_CO2_A13_1000_5000(1) +
      const_CO2_A13_1000_5000(2)*T + const_CO2_A13_1000_5000(3)*

```

```

    T^2 + const_CO2_A13_1000_5000(4)*T^3 +
    const_CO2_A13_1000_5000(5)*T^4);
97 cp_H2O(j) = const_gas(8)*(const_H2O_A13_1000_5000(1) +
    const_H2O_A13_1000_5000(2)*T + const_H2O_A13_1000_5000(3)*
    T^2 + const_H2O_A13_1000_5000(4)*T^3 +
    const_H2O_A13_1000_5000(5)*T^4);
98 cp_O2(j) = const_gas(11)*(const_O2_A13_1000_5000(1) +
    const_O2_A13_1000_5000(2)*T + const_O2_A13_1000_5000(3)*T
    ^2 + const_O2_A13_1000_5000(4)*T^3 +
    const_O2_A13_1000_5000(5)*T^4);
99 cp_N2(j) = const_gas(9)*(const_N2_A13_1000_5000(1) +
    const_N2_A13_1000_5000(2)*T + const_N2_A13_1000_5000(3)*T
    ^2 + const_N2_A13_1000_5000(4)*T^3 +
    const_N2_A13_1000_5000(5)*T^4);
100 cp_mist(j) = (cp_C4H10(j)*percentmist(2))+(cp_C3H8(j)*
    percentmist(3))+(cp_C4H8(j)*percentmist(4))+(cp_C3H6(j)*
    percentmist(5));
101
102
103
104 cv_C4H10(j) = cp_C4H10(j) - const_gas(2);
105 cv_C3H8(j) = cp_C3H8(j) - const_gas(3);
106 cv_C4H8(j) = cp_C4H8(j) - const_gas(4);
107 cv_C3H6(j) = cp_C3H6(j) - const_gas(5);
108 cv_CO2(j) = cp_CO2(j) - const_gas(7);
109 cv_H2O(j) = cp_H2O(j) - const_gas(8);
110 cv_O2(j) = cp_O2(j) - const_gas(11);
111 cv_N2(j) = cp_N2(j) - const_gas(9);
112 cv_mist(j) = (cv_C4H10(j)*percentmist(2))+(cv_C3H8(j)*
    percentmist(3))+(cv_C4H8(j)*percentmist(4))+(cv_C3H6(j)*
    percentmist(5));
113
114 K_C4H10(j) = cp_C4H10(j)/cv_C4H10(j);
115 K_C3H8(j) = cp_C3H8(j)/cv_C3H8(j);
116 K_C4H8(j) = cp_C4H8(j)/cv_C4H8(j);
117 K_C3H6(j) = cp_C3H6(j)/cv_C3H6(j);
118 K_mist(j) = (K_C4H10(j)*percentmist(2))+(K_C3H8(j)*
    percentmist(3))+(K_C4H8(j)*percentmist(4))+(K_C3H6(j)*
    percentmist(5));

```

```
119
120
121 vel_som_gas(j) = ((K_mist(j)*const_gas(1)*T)^(1/2));
122
123
124
125
126 end
127
128
129 end
```

C.5 Função: Quantidade de Calor

Listing C.5 – Código 2

```

1
2 function [cpmedio,quantidade_calor_total]=
    QATM_Quantidadecalor(T_inicial_gas,fluxo_massico_final,Cp,
    Cv,K,Temp_adiabatica,passo_pressao_operacao,
    pressao_maxima_operacao,fluxo_massico_primario,
    fluxo_massico_secundario,Cp_queima,Cv_queima,K_queima,
    percentmist,abertura,pressao_MISTURA)
3
4 quantidade_calor_total = [];
5 cpmedio = [];
6 for i=62:1:length(Temp_adiabatica(6,:))
7 for j=1:passo_pressao_operacao:length(pressao_MISTURA)
8     %for m=1:1:length(abertura)
9     %cpmedio = ((Cp_queima(1,i)+Cp(1,i))/2)*
        fluxo_massico_primario(j)/fluxo_massico_final(i,j));
10    %cpmedio(i,j) = (((Cp_queima(2,i)*percentmist(2))+
        Cp_queima(3,i)*percentmist(3))+Cp_queima(4,i)*
        percentmist(4))+Cp_queima(5,i)*percentmist(5))+((
        Cp_queima(2,298)*percentmist(2))+Cp_queima(3,298)*
        percentmist(3))+Cp_queima(4,298)*percentmist(4))+
        Cp_queima(5,298)*percentmist(5)))/2))*
        fluxo_massico_primario(j)/fluxo_massico_final(i,j)))
        +(((Cp(12,i)+(Cp(12,293)))/2)*fluxo_massico_secundario
        (i,j)/fluxo_massico_final(i,j));
11    cpmedio(i,j) = (((((Cp_queima(3,i)*percentmist(3))+
        Cp_queima(4,i)*percentmist(4))+((Cp_queima(3,298)*
        percentmist(3))+Cp_queima(4,298)*percentmist(4))))/2)
        )*(fluxo_massico_primario(j)/fluxo_massico_final(i,j))
        +(((Cp(12,i)+(Cp(12,293)))/2)*fluxo_massico_secundario
        (i,j)/fluxo_massico_final(i,j));
12    %end
13    quantidade_calor_total(i,j) = fluxo_massico_final(i,j)*
        cpmedio(i,j)*((Temp_adiabatica(6,i))-(T_inicial_gas));
        %% [KJ/s] = [W]
14    %quantidade_calor_total(i,j) = fluxo_massico_final(i,j)*
        cpmedio(i,j)*(Temp_adiabatica(6,i)-T_inicial_gas);

```

```
15 end  
16 end
```